

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

**ESTRUTURAS DE INFILTRAÇÃO COM UTILIZAÇÃO DE  
MATERIAIS ALTERNATIVOS NO CONTROLE DE  
ALAGAMENTOS, INUNDAÇÕES E PREVENÇÃO DE PROCESSOS  
EROSIVOS**

**JOSELEIDE PEREIRA DA SILVA**

**ORIENTADOR: JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO:G.TD – 074/2012**

**BRASÍLIA / DF: FEVEREIRO/2012**

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

**ESTRUTURAS DE INFILTRAÇÃO COM UTILIZAÇÃO DE**  
**MATERIAIS ALTERNATIVOS NO CONTROLE DE**  
**ALAGAMENTOS, INUNDAÇÕES E PREVENÇÃO DE PROCESSOS**  
**EROSIVOS**

**JOSELEIDE PEREIRA DA SILVA**

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

**APROVADA POR:**

---

**JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, DSc (UnB)**  
**(ORIENTADOR)**

---

**GREGÓRIO LUIZ DE ARAÚJO, DSc (UnB)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, DSc (UnB)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**MARIA EUGÊNIA GIMENEZ BOSCOV, DSc (USP)**  
**(EXAMINADOR EXTERNO)**

---

**MAURÍCIO MARTINEZ SALES, DSc(UFG)**  
**(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 17DE FEVEREIRODE 2012.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, JOSELEIDE PEREIRADA

Estruturas de Infiltração com Utilização de Materiais Alternativos no Controle de Alagamentos, Inundações e Prevenção de Processos Erosivos.

xx, 215p., 210 mm x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2012)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Trincheiras de Infiltração

2. Materiais Alternativos

3. Garrafas Pet

4. Solos Colapsíveis

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, J.P. (2012). Estruturas de Infiltração com Utilização de Materiais Alternativos no Controle de Alagamentos, Inundações e Prevenção de Processos Erosivos. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-074/2012, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 215p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Joseleide Pereira da Silva

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Estruturas de Infiltração com Utilização de Materiais Alternativos no Controle de Alagamentos, Inundações e Prevenção de Processos Erosivos.

GRAU / ANO: Doutor / 2012

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

---

Joseleide Pereira da Silva

Av. Capitão Júlio Bezerra, nº 2271, Bairro 31 de Março.

CEP 69305-294–Boa Vista/RR – Brasil.

*Dedico este trabalho aos responsáveis por minhas vitórias:  
À Deus,  
Aos Meus pais Idá e José Ribamar e  
Aos meus irmãos: Gloneide, Gldeban e Josineide,  
pelo incentivo e apoio em todos os momentos.*

*"E Jesus disse-lhe: Se tu podes crer, tudo é possível ao que crê."  
Marcos 9:23*

## AGRADECIMENTOS

---

À Deus, pela luz em meus caminhos.

Aos meus pais, pelos ensinamentos, exemplos e valores, sempre me guiando pela vida.

À Luiz Gustavo pelo incentivo, apoio e carinho.

Ao Professor José Camapum de Carvalho, pela orientação, disponibilidade, paciência, apoio e incentivo durante o desenvolvimento deste trabalho, pelo privilégio que tive por ser sua orientada. Agradeço, também, pelo profissionalismo, humanidade, compreensão e amizade.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, Márcio, Manoel, André Assis, Ennio, Newton, Hernan, Gregório, Noris, Murrieta por todo o conhecimento transmitido e por eventuais sugestões e críticas.

Aos amigos parceiros nesta jornada: Graça, Lorena, Carmem, Eder, Marcos, Janaína, Maria Tâmara e Petrônio, pelo carinho, amizade, paciência e incentivo.

As famílias Luz e Cardoso, pela amizade, carinho, apoio e por ter tornado a distância dos meus, menos dolorosa.

Ao CNPq pelo apoio financeiro

Por fim, agradeço a todos aqueles que por acaso deixei de citar, mas que, de alguma forma, contribuíram com esta pesquisa. Meus sinceros agradecimentos a todos!

## RESUMO

# ESTRUTURAS DE INFILTRAÇÃO COM UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS NO CONTROLE DE ALAGAMENTOS, INUNDAÇÕES E PREVENÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS

Problemas ocasionados pelo crescimento desordenado nos grandes centros urbanos são frequentemente abordados em noticiários. A ocupação desses centros acarreta no aumento da impermeabilização da superfície, no qual uma parcela de água que infiltraria no solo passa a compor o escoamento superficial, implicando no aumento dos volumes escoados que, direcionados, causam alagamentos, enchentes e erosões. Associado a isso, salienta-se, que o Distrito Federal possui solos, com característica meta-estável, ou seja, solos que apresentam diminuição de volume, quase sempre brusca, quando submetido a carregamentos, saturações ou alterações do estado de tensões. Esta pesquisa torna-se relevante pelo fato de associar aspectos de ordem técnica e econômica na solução de questões que buscam minimizar os dois fatores supracitados, por meio da implantação de trincheiras de infiltração. Estas trincheiras foram construídas conforme técnicas tradicionais (utilizando-se brita e areia) e empregando-se materiais alternativos (garrafas Pet). As garrafas Pet, além de ser de um material de menor peso específico quando comparadas com brita e areia, contribuem para evitar a perda da capacidade de infiltração por colapso do solo e são produtos encontrados em abundância, duráveis, recicláveis e de baixo custo. As trincheiras de infiltração propostas associam as características de capacidade de suporte dos materiais reciclados Pet ao potencial colapsível e erodível dos solos regionais. Por meio dos ensaios de caracterização do solo, de adensamento oedométrico, *de pinhole test*, de permeabilidade no adensamento utilizando a célula Rowe, infiltração e infiltração com monitoramento da umidade, determinaram-se diversas características mecânicas e hidráulicas do solo. Nas trincheiras construídas foram realizados ensaios de enchimento e provas de carga. Os resultados apresentados mostram que as trincheiras constituem uma alternativa viável para resolver problemas ligados ao excesso de fluxo superficial oriundo de precipitações pluviométricas, bem como indicam a possibilidade técnica de uso de garrafas Pet nestes sistemas de infiltração.

## **ABSTRACT**

### ***INFILTRATION STRUCTURES USING ALTERNATIVE MATERIALS IN CONTROL OF FLOODING, FLOOD AND EROSION PREVENTION***

*Problems caused by the uncontrolled growth in urban centers are often covered in the news. The occupation of these centers leads to the increase of surface sealing, in which a portion of water that seep into the soil starts to compose runoff, resulting in increased volumes disposed that targeted, causing flooding, flood and erosion. Associated with this, it is noted that the soil of Distrito Federal, with a characteristic called “meta-estável”, ie, soils with a decrease in volume, often sharply, when subjected to loads, saturation or change the state of tension. This research is relevant because associate technical and economic aspects in the solution of questions that seek to minimize the above two factors, through the implementation of infiltration trenches. These trenches were built according to traditional techniques (using gravel and sand) and by using alternative materials (Pet bottles). The Pet bottles as well as being a material of lower specific weight when compared with gravel and sand, help to avoid the loss of ability to infiltration by the collapse of soil and are products found in abundance, durable, recyclable and cheap. The proposed infiltration trenches combine the characteristics of bearing capacity of the Pet recycled materials with the collapsible and erodible potential of the regional soils. Through the characterization tests of the soil, consolidation tests, pinhole tests, the permeability test using Rowe cell, infiltration test and infiltration with the monitoring of moisture, several mechanical and hydraulic characteristics of the soil were determined. In the constructed trenches, filling tests and load tests were also performed. The results show that the trenches are a viable alternative to solve problems related to overland flow excess originating from rainfall, as well as indicate the technical feasibility of using Pet bottles in these infiltration systems.*

# SUMÁRIO

Capítulo	Página
<b>1- INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1- DELINEAMENTO DO ESTUDO.....	2
1.2- OBJETIVOS .....	2
1.3- ESCOPO DA TESE.....	5
<b>2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>6</b>
2.1- CONCEITOS DE ÁGUA E SOLO .....	6
2.2- DINÂMICA DA ÁGUA.....	8
2.2.1- POTENCIAL DE ÁGUA NO SOLO .....	8
2.2.2- CÁLCULO DA ÁGUA NO SOLO .....	12
2.2.3- INFILTRAÇÃO .....	13
2.2.4- CILINDROS CONCÊNTRICOS.....	16
2.2.5- ASPECTOS RELATIVOS AOS MECANISMOS DE INFILTRAÇÃO.....	18
2.3- IMPACTO DA URBANIZAÇÃO NOS SISTEMAS DE DRENAGEM .....	20
2.4- SISTEMAS CLÁSSICOS DE DRENAGEM.....	21
2.5- SISTEMAS ALTERNATIVOS DE DRENAGEM.....	22
2.5.1- TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO .....	24
2.5.2- TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO UTILIZANDO MATERIAIS ALTERNATIVOS .....	31
2.6- REFERÊNCIAS UTILIZADAS NA PESQUISA .....	32
2.7- SOLOS COLAPSÍVEIS .....	34
2.8- UTILIZAÇÃO DE MATERIAL RECICLADO PET .....	35
2.9- GEOESTATÍSTICA .....	36
2.9.1- INTERPOLAÇÃO .....	37
<b>3- MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>39</b>
3.1- INTRODUÇÃO .....	39
3.2- LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE TRABALHO .....	39
3.3- ENSAIOS DE CAMPO .....	41
3.3.1- PENETRÔMETRO DINÂMICO LEVE (PANDA).....	41
3.3.2- ENSAIOS PARA RECONHECIMENTO DA ÁREA .....	42
3.3.3- PERMEABILIDADE E MEDIÇÃO DA UMIDADE.....	43
3.4- ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	47
3.5- CONSTRUÇÃO DAS CÉLULAS EXPERIMENTAIS DE CAMPO .....	54
3.5.1- DIMENSIONAMENTO DAS TRINCHEIRAS.....	54
3.5.2- MATERIAIS UTILIZADOS NO ENCHIMENTO DAS TRINCHEIRAS .....	56
3.5.3- CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DAS TRINCHEIRAS .....	59
3.5.4- INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO .....	65

3.6- ENSAIOS DE ENCHIMENTO .....	72
3.7- PROVAS DE CARGA.....	74
3.8- DADOS METEREOLÓGICOS DA ÁREA .....	76
3.9- TRATAMENTO GEOESTATÍSTICO DOS DADOS.....	77
3.9.1- DADOS DOS ENSAIOS DE ENCHIMENTO .....	77
3.9.2- DADOS DOS ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO E PERFIS DE UMIDADE .....	78
<b>4- RESULTADOS.....</b>	<b>81</b>
4.1- ENSAIOS PARA RECONHECIMENTO DA ÁREA .....	81
4.1.1- PERMEABILIDADE EM FURO DE SONDAÇÃO E CILINDROS CONCÊNTRICOS .....	81
4.1.2- PENETRÔMETRO DINÂMICO LEVE (PANDA).....	83
4.2- ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	84
4.2.1- CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA.....	84
4.2.2- CLASSIFICAÇÃO MCT EXPETIDA .....	89
4.2.3- CURVAS CARACTERÍSTICAS (SUCCÃO) .....	89
4.2.4- PERMEABILIDADE.....	91
4.2.5- ENSAIO DE FURO DE AGULHA ( <i>PINHOLE TEST</i> ) .....	93
4.2.6- ADENSAMENTO OEDOMÉTRICO .....	94
4.2.7- PERMEABILIDADE NO ADENSAMENTO (CÉLULA ROWE) .....	95
4.3- DADOS DA ESTAÇÃO METEREOLÓGICA.....	100
4.3.1- PRECIPITAÇÃO .....	100
4.3.2- UMIDADE DO SOLO.....	100
4.3.3- TEMPERATURA DO SOLO .....	101
4.3.4- UMIDADE RELATIVA E TEMPERATURA DO AR .....	103
4.3.5- DADOS ACUMULADOS DE PRECIPITAÇÃO.....	104
4.4- ENSAIO DE PERMEABILIDADE EM FURO DE SONDAÇÃO COM MONITORAMENTO DO PERFIL DE UMIDADE.....	105
4.4.1- ETAPAS DOS ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO.....	105
4.4.2- PERFIS DE UMIDADES .....	113
4.4.3- PERFIS DE UMIDADES SEGUNDO MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO.....	118
4.5- MATERIAIS UTILIZADOS NO ENCHIMENTO DAS TRINCHEIRAS .....	126
4.5.1- ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES .....	126
4.5.2- ENSAIOS DE COMPRESSÃO DO CONJUNTO .....	129
4.6- ENSAIOS DE ENCHIMENTO .....	131
4.6.1- RESULTADOS DO SENSOR DE NÍVEL .....	133
4.6.2- RESULTADOS DOS TENSÍMETROS .....	139
4.6.3- RESULTADOS DOS PIEZÔMETROS .....	151
4.6.4- RESULTADOS DOS PERFIS DE UMIDADE .....	154

4.6.5- RESULTADOS DA ANÁLISE DA ÁGUA .....	158
4.7- ENSAIOS DE ENCHIMENTO .....	160
<b>5- CONCLUSÕES .....</b>	<b>166</b>
5.1- SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	168
<b>6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>170</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
Tabela 2.1 – Métodos de medida de sucção (Silva, 2005). .....	8
Tabela 2.2 –Estudos do acréscimo da vazão de pico devido impermeabilização do solo. ....	21
Tabela 2.3 –Ordem da grandeza da condutividade hidráulica em diferentes solos (Musy&Soutter, 1991 <i>apud</i> Lima, 2009). .....	26
Tabela 3.1 – Ensaios de campo – Fase de seleção da área. ....	42
Tabela 3.2 – Etapas de ensaios de permeabilidade e umidade em campo. ....	46
Tabela 3.3 –Tensões e gradientes utilizados em cada etapa.....	53
Tabela 3.4 – Dimensões e características das células construídas. ....	61
Tabela 3.5 - Tipos de arranjos. ....	62
Tabela 3.6 – Profundidades dos tensiômetros fixos. ....	69
Tabela 3.7 – Profundidades dos tensiômetros móveis. ....	71
Tabela 3.8 – Quantidade, marcas e modelos dos equipamentos utilizados na estação meteorológica. ....	77
Tabela 4.1 – Permeabilidade de campo. ....	82
Tabela 4.2 – Resultados de resistência à profundidade. ....	84
Tabela 4.3 – Caracterização física dos solos. ....	84
Tabela 4.4 – Análise Granulométrica dos Solos. ....	86
Tabela 4.5 – Limites de Atterberg. ....	88
Tabela 4.6 – Classificação MCT do solo. ....	89
Tabela 4.7 – Permeabilidades medidas por meio de ensaios de infiltração. ....	106
Tabela 4.8 - Resultados de resistência a compressão simples das garrafas Pet. ....	127
Tabela 4.9 - Resultados de módulo de elasticidade calculados para as garrafas Pet a partir dos resultados dos ensaios de resistência a compressão simples. ....	128
Tabela 4.10 – Etapas dos ensaios de enchimentos. ....	132
Tabela 4.11 - Análise da água utilizada nos ensaios de enchimento. ....	159
Tabela 4.12– Trincheiras submetidas à prova de carga. ....	160

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
Figura 1.1 – Fluxograma das atividades realizadas.....	4
Figura 2.1 – Ciclo hidrológico (Cola Web, 2011).....	6
Figura 2.2 – Zonas passagem da água no solo. ....	7
Figura 2.3 – Tensiômetro e seus componentes.....	10
Figura 2.4 – Tipos de dispositivos de medição de pressão (Silva Junior, 2011).....	10
Figura 2.5 – Tensiômetro eletrônico e seus componentes.....	11
Figura 2.6 –Taxa e infiltração acumulada ao longo do tempo para um mesmo solo. ....	14
Figura 2.7 – Modelo do ensaio de permeabilidade pelo método de rebaixamento (Boletim Nº 4 ABGE 1996).....	16
Figura 2.8 – Esquema de montagem do Infiltrômetro de Cilindros Concêntricos. (Souza, 2002).....	17
Figura 2.9 –Disposição de trincheiras de infiltração. (Camapum de Carvalho &Lelis, 2010)	23
Figura 2.10 –Ilustração de trincheiras de infiltração.....	25
Figura 2.11 –Modelos de Trincheiras: a) de Infiltração e, b) de retenção. (Azzoutet <i>al</i> , 1994). .....	27
Figura 2.12 – Trincheiras de infiltração com utilização de garrafas Pet (Camapum de Carvalho &Lelis , 2011).....	32
Figura 2.13- Ocorrência de colapso em prova de carga realizada com inundação do solo durante o ensaio (CINTRA,1998). ....	35
Figura 2.14 –Gráfico: produção x reciclagem de garrafas Pet (ABIPET, 2008). ....	36
Figura 3.1 –Localização do Distrito Federal (Baptista, 1997). ....	39
Figura 3.2 – Localização do Campus Darcy Ribeiro. ....	40
Figura 3.3– a) Sistema de funcionamento do ensaio PANDA. (Modificado- Langdon,1999 <i>apud</i> Araújo, 2009); b) Realização do ensaio PANDA próximo ao ensaio de infiltração.....	42
Figura 3.4 –Área de implantação das trincheiras (Silva, 2007). ....	43
Figura 3.5 - Ensaio de rebaixamento em furo de sondagem a trado. ....	44
Figura 3.6 - Distribuição dos furos para retirada de amostras, controle de umidade e ensaios de infiltração.....	45
Figura 3.7 - Perfil de coletas de amostras. ....	47
Figura 3.8 - Corte transversal esquemático da célula Rowe (Silva, 2006). ....	49
Figura 3.9 - a) Sikadur 32 utilizado para colagem da areia e b) molde da pedra porosa. ....	50
Figura 3.10– a) Prensa utilizada e b) pedra porosa em seu estado final.....	51
Figura 3.11 - Arranjo geral com detalhes das conexões e tubulações. (Silva, 2006).....	52

Figura 3.12 – Visualização em corte da localização dos blocos utilizados para realização dos ensaios de adensamento e permeabilidade na célula Rowe. ....	54
Figura 3.13 – Arranjo de garrafas: (a) inteiras verdes e (b) cortadas-acopladas.....	56
Figura 3.14– Arranjo de garrafas: (a) inteiras variadas e (b) amassadas. ....	57
Figura 3.15 - Procedimento do ensaio de compressão individual (Silva, 2007). ....	57
Figura 3.16 – Equipamento do ensaio de compressão dos conjuntos. ....	58
Figura 3.17– Sistema de montagem das Trincheiras (SILVA,2007). ....	60
Figura 3.18 – (T1) Trincheira 1 – arranjo com 0,7m de PET (garrafas cortada/furada/acoplada) + brita + areia. ....	62
Figura 3.19 – (T2) Trincheira 2 – arranjo com 0,35m de PET (garrafas cortada/furada/acoplada) + brita + areia.....	62
Figura 3.20 – (T3) Trincheira 3 – arranjo com 1,2m de PET (garrafas cortada/furada/acoplada) + brita + areia. ....	63
Figura 3.21 – (T4) Trincheira 4 – arranjo brita + areia. ....	63
Figura 3.22 – (T5) Trincheira 5 – arranjo com 1,47m de PET (garrafas inteiras fechadas com tampa) + brita + areia. ....	63
Figura 3.23– (T6) Trincheira 6 – arranjo com tijolos em crivo. ....	64
Figura 3.24– (T7) Trincheira 7 – arranjo com 0,8m de PET (garrafas amassadas) + brita + areia. ....	64
Figura 3.25 – Esquema de montagem dos piezômetros. ....	66
Figura 3.26 – Vista superior da trincheira, layout de localização dos piezômetros. ....	66
Figura 3.27 – Procedimento de saturação e calibração dos tensiômetros com vacuômetro (TRACOM, 2011). ....	67
Figura 3.28 – Procedimento de implantação dos tensiômetros com vacuômetro (Adaptado por Azevedo <i>et al.</i> , 1983). ....	68
Figura 3.29 – Vista superior da trincheira, layout de localização dos tensiômetros. ....	69
Figura 3.30 – Saturação do tensiômetro (Silva Junior, 2011). ....	70
Figura 3.31 – Transmissor de pressão, TR-511.....	71
Figura 3.32 – Posicionamento do sensor de nível na trincheira. ....	72
Figura 3.33 – Utilização de caminhão pipa e de caixas d’água no ensaio de enchimento. ....	73
Figura 3.34 – Disposição das provas de carga. ....	74
Figura 3.35 – Vigas e blocos de reação das provas de cargas.....	75
Figura 3.36 – Sistemas de aplicação e medição de carga.....	75
Figura 3.37 – Disposição dos defletômetros nas provas de cargas. ....	76
Figura 3.38 – Estação metereológica na área em estudo.....	76
Figura 4.1 – Permeabilidade de campo. ....	82
Figura 4.2 – Resistências obtidas para o perfil de solo da UnB (Silva, 2007). ....	83

Figura 4.3 – Curvas granulométricas: a) 0,0 a 0,5m; b) 0,5 a 1,0m; c) 1,0 a 1,5m e d) 1,5 a 1,8m.....	87
Figura 4.4 – Curvas características: umidade versus sucção.....	90
Figura 4.5 – Permeabilidade horizontal e vertical.....	92
Figura 4.6 – Gráfico do <i>Pinhole test</i> . ....	93
Figura 4.7 – Curvas de Compressibilidade Natural e Inundado nos trechos: 1,5m a 2,0m e 2,0 a 2,5m. ....	94
Figura 4.8 – Potencial de colapso do solo. ....	95
Figura 4.9 – Coeficiente de permeabilidade <i>versus</i> tensão normal, na amostra de 1,0 a 1,5m de profundidade.....	96
Figura 4.10 – Variação da permeabilidade horizontal <i>versus</i> gradiente, no trecho de 1,0 a 1,5m. ....	97
Figura 4.11 – Coeficiente de permeabilidade <i>versus</i> tensão normal, na amostra de 1,5m a 2,0m de profundidade. ....	97
Figura 4.12 – Variação da permeabilidade vertical <i>versus</i> gradiente, no trecho de 1,5 a 2,0m de profundidade. ....	98
Figura 4.13– Curvas de adensamento normalizadas $e_i/e_o$ . ....	99
Figura 4.14– Permeabilidade horizontal <i>versus</i> permeabilidade vertical.....	99
Figura 4.15 – Precipitações máximas e médias diárias, dos anos 2010 e 2011. ....	100
Figura 4.16 – Umidade do solo superficial, 2010 e 2011.....	101
Figura 4.17 - Temperaturas médias mensais do solo superficial, ano 2010.....	102
Figura 4.18 – Temperaturas médias mensais do solo superficial, ano 2011. ....	102
Figura 4.19 – Precipitação, umidade e temperatura do solo, ano 2010.....	103
Figura 4.20 – Umidade relativa média do ar, ano 2010 e 2011. ....	103
Figura 4.21 – Temperatura média do ar, ano 2010 e 2011.....	104
Figura 4.22 – Precipitação acumulada nos meses de ensaio. ....	105
Figura 4.23 – Dados meteorológico do mês de agosto de 2010.....	107
Figura 4.24 – Dados meteorológicos do mês de setembro de 2010. ....	108
Figura 4.25 – Dados meteorológicos do mês de outubro de 2010. ....	109
Figura 4.26 -Dados meteorológicos do mês de novembro de 2010. ....	110
Figura 4.27– Dados meteorológicos do mês de dezembro de 2010. ....	111
Figura 4.28 – Dados meteorológicos do mês de janeiro de 2011.....	112
Figura 4.29- Dados meteorológicos do mês de fevereiro de 2011.....	113
Figura 4.30– Perfil típico de umidade. ....	114
Figura 4.31 – Perfis de umidade dos ensaios de infiltração 1º furo: a) antes e b)depois. ....	115
Figura 4.32– Perfis de umidade dos ensaios de infiltração 2º furo: a) antes e b)depois. ....	116
Figura 4.33– Perfis de umidade dos ensaios de infiltração 3º furo: a) antes e b)depois. ....	116

Figura 4.34 – Perfis de umidade dos ensaios de infiltração 4º furo: a) antes e b)depois. ....	117
Figura 4.35– Perfil de umidade em solo a partir de um fluxo d’água em furo de sondagem.	117
Figura 4.36 –Superfície de umidade: a) 11/08/10, b).14/08/10, c).29/09/10, d) 21/10/10.....	119
Figura 4.37 –Superfícies de umidade: a) 27/11/10, b).10/12/10, c).24/01/11, d)21/02/11. ...	123
Figura 4.38 - Compressão individual das garrafas. ....	127
Figura 4.39 – Compressão dos conjuntos: garrafas cortadas-acopladas e garrafas amassadas. ....	129
Figura 4.40 – Gráfico: Tensão <i>versus</i> Deformação do conjunto de garrafas amassadas. ....	130
Figura 4.41 – Gráfico: Tensão <i>versus</i> Deformação do conjunto de garrafas cortadas/acopladas. ....	131
Figura 4.42 – Sensor de nível: Profundidade x Tempo: a)2ª etapa (Dez/2010); b)3ª etapa (Fev/2011); e c) 4ª etapa (Jul/2011). ....	134
Figura 4.43– Sensor de nível: Profundidade x Tempo: a)2ª etapa (Dez/2010); b)3ª etapa (Fev/2011); e c) 4ª etapa (Jul/2011). ....	136
Figura 4.44 – Sensor de nível: Profundidade x Tempo, ensaio contínuo da trincheira 5.....	138
Figura 4.45 – Sensor de nível: Profundidade x Tempo, ensaio contínuo da trincheira 5, partes sobrepostas. ....	138
Figura 4.46- Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do primeiro ensaio de enchimento Trincheira 1 (23/08/10). ....	139
Figura 4.47 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do primeiro ensaio de enchimento Trincheira 2 (22/08/10). ....	140
Figura 4.48 – a e b) resultados obtidos para a profundidade de 2m; c e d) resultados obtidos a distancia de 1m da trincheira em projeção horizontal. ....	141
Figura 4.49 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do segundo ensaio de enchimento Trincheira 1. ....	142
Figura 4.50 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do segundo ensaio de enchimento Trincheira 2. ....	142
Figura 4.51– Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do segundo ensaio de enchimento Trincheira 3. ....	142
Figura 4.52 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do terceiro ensaio de enchimento Trincheira 1. ....	143
Figura 4.53 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do terceiro ensaio de enchimento Trincheira 2. ....	143
Figura 4.54– Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do terceiro ensaio de enchimento Trincheira 6. ....	144
Figura 4.55 – a) Distribuição dos tensiômetros; b) tempo de queda da sucção em função da sucção inicial segundo a localização do ponto. ....	146
Figura 4.56 – a) corte com esboço do fluxo vertical a partir da trincheira; b) corte com esboço do fluxo horizontal a partir da trincheira. ....	147

Figura 4.57 - Poropressão: a) $t = 0$ ; b) $t = 1$ hora; c) $t = 2$ horas; d) $t = 4$ horas. (Gitirana, 2012).....	148
Figura 4.58 - Grau de saturação: a) $t = 0$ ; b) $t = 1$ hora; c) $t = 2$ horas; d) $t = 4$ horas .....	148
Figura 4.59 - Poropressão em planos horizontais para $t=4$ horas: a) $z = 0m$ ; b) $z = -1m$ ; c) $z = -2m$ ; d) $z = -3m$ . (Gitirana, 2012).....	149
Figura 4.60 - Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, primeiro ensaio de enchimento a) Trincheira 1 e b)Trincheira 2.....	150
Figura 4.61 – Correlação dos tensiômetros vacuômetros.....	150
Figura 4.62 – Layout de distribuição dos piezômetros. ....	151
Figura 4.63 – Gráfico Piezômetro: Profundidade x Tempo, Trincheira 2. ....	152
Figura 4.64 - Gráfico Piezômetro: Profundidade x Tempo, Trincheira 2: a) 1ª etapa e b) 2ª etapa de ensaios de enchimento.....	152
Figura 4.65 - Gráfico Piezômetro: Profundidade x Tempo, Trincheira 2, 3ª etapa de ensaios de enchimento. ....	153
Figura 4.66 – Gráfico Piezômetro: Profundidade x Tempo, ensaio de enchimento Trincheira 5 – contínuo completo. ....	153
Figura 4.67 – Umidade antes e depois do ensaio, trincheiras 1 a 7 – 1º Ensaio. ....	154
Figura 4.68 – Umidade:a) antes e b) depois do ensaio, trincheiras 1 a 7 – 1º Ensaio.....	155
Figura 4.69 – Umidade:a) antes e b) depois do ensaio, trincheiras 1 a 7 – 2º Ensaio.....	156
Figura 4.70 – Umidade:a) antes e b) depois do ensaio, trincheiras 1 a 7 – 3º Ensaio.....	156
Figura 4.71 – Umidade antes, durante e depois do ensaio contínuo, trincheiras 5. ....	157
Figura 4.72 - a) Profundidade do nível d'água (NA) no piezômetro P1 em função da umidade média abaixo do NA antes dos ensaios de infiltração; b) Profundidade do NA no piezômetro P4 em função da umidade média abaixo do NA antes dos ensaios de infiltração ; c) Profundidade do NA no piezômetro P1 em função da umidade média do perfil antes dos ensaios de infiltração; d) Profundidade do NA no piezômetro P4 em função da umidade média do perfil antes dos ensaios de infiltração.....	158
Figura 4.73 – Provas de carga no solo e no eixo da trincheira 3, antes e depois o ensaio de enchimento. ....	161
Figura 4.74 – Provas de carga no solo e no eixo da trincheira 5, antes e depois o ensaio de enchimento. ....	163
Figura 4.75 – Provas de carga no solo e no eixo da trincheira 7, antes e depois o ensaio de enchimento. ....	164
Figura 4.76 – Provas de carga no eixo das trincheiras e no solo próximo às trincheiras 3, 5 e 7, (a) antes e (d) depois do ensaio de enchimento.....	165

## LISTA DE ABREVIACES, NOMENCLATURAS E SBOLOS

#	Abertura das peneiras
A	rea de contribuição
a,b,c	Parâmetros da equação $\beta$
ABGE	Associação Brasileira de Geologia de Engenharia
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ac	rea da bacia de contribuição
ANOVA	Análise de Variância
$A_{perc}$	área total dos lados da estrutura de percolação
$A_T$	rea em planta da trincheira
B	Largura da trincheira
c	Coefficiente de escoamento
$c'$	Coesão efetiva do solo no estado saturado
CD	Com Defloculante
CP	Potencial de colapso
CU	Com Ultra-som
DF	Distrito Federal
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNER-ME	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio
DRX	Difratometria de Raios-X
e	ndice de Vazios
$e_o$	ndice de Vazios inicial
$e_o$	ndice de vazios inicial (antes da inundação)
GO	Goiás
H	Profundidade da trincheira
h	Altura da coluna d'gua
H – V	Transição do ensaio de permeabilidade horizontal para o vertical
$H_E$	Lâmina d'água de entrada acumulada rebatida sobre a área em planta da trincheira
$H_{ij}$	Distância entre o nó da grade e $Z_i$
$H_S$	Lâmina d'água de saída acumulada rebatida sobre a área em planta da trincheira
i	Intensidade da chuva
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Intensidade duração e frequência
IDF	Intensidade, duração e frequência
IDW	<i>InverseDistanceWeighted</i>
$I_T$	Intensidade da precipitação de T anos de retorno
k	Condutividade hidráulica saturada do solo
$k_{campo}$	Permeabilidade em campo
$k_H$	Permeabilidade horizontal
$k_{lab}$	Permeabilidade de laboratório
$k_V$	Permeabilidade Vertical
L	Comprimento da trincheira

m/s	Metro por segundo
mca	Metro de coluna d'água
mm/h	Milímetros por hora
Ms	Massa dos sólidos (solo seco)
Mt	Massa total (sólido + água + ar)
Mw	Massa de água
n	Número de pontos amostrados utilizados para interpolar cada nó
NA máximo	Nível d'água máximo
NBR	Normas Brasileiras
Pa	Pet amassada
PANDA	<i>PénétrromètreAutomatiqueNumériqueDynamiqueAssisté</i>
Pca	PET cortada-acoplada
PEG	Polietilenoglicol
PET	Politereftalato de etileno
Pi	PET inteira
qd	Resistência de ponta do solo
q <sub>s</sub>	Vazão de saída constante do dispositivo
R	Raio de Influência
r	Raio do furo de sondagem
SD	Sem Defloculante
SP	São Paulo
Sr	Saturação
SU	Sem Ultra-som
T	Período de retorno
T1	Trincheira 1
T2	Trincheira 2
T3	Trincheira 3
T4	Trincheira 4
tp	Tempo de percolação
u <sub>a</sub>	Pressão no ar existentes nos poros
UFV	Universidade de Viçosa
UNB	Universidade de Brasília
u <sub>w</sub>	Pressão na água existentes nos vazios do solo
V- V	Transição de ensaios de permeabilidade verticais nas profundidades diferentes
V <sub>máx</sub>	Volume de máxima diferença entre os volumes de entrada e de saída
V <sub>perc</sub>	Volume de água percolado no solo
V <sub>T</sub>	Volume total escoado no tempo t para uma precipitação de T anos de retorno
w	Umidade gravimétrica
w <sub>L</sub>	Limite de liquidez
w <sub>p</sub>	Limite de Plasticidade
Z(x <sub>i</sub> )	Dado amostrado
Z	Valor interpolado para o nó do reticulado (grid)
Z <sub>i</sub>	Valor do ponto amostrado vizinho ao nó

$(\sigma - u_a)$		Tensão normal
$\nabla \emptyset$		Gradiente hidráulico
$\phi$		Diâmetro
$\lambda_i$		Fatores de ponderação
$\emptyset'$	Ângulo de atrito interno às variações no termo $(\sigma - u_a)$ , quando $(u_a - u_w)$ é mantido constante	
$\emptyset^b$	Ângulo de atrito interno relativo às variações no termo $(u_a - u_w)$ , quando $(\sigma - u_a)$ é mantida constante	
$\beta$		Expoente de ponderação (peso)
$\gamma_H$	razão entre a área de percolação e a área do dispositivo em planta	
$\gamma_n$		Peso específico Natural
$\gamma_s$		Peso específico das partículas sólidas
$\Delta e$		Variação do índice de vazios na inundação
$\Delta h$		Variação da coluna d'água
$\Delta t$		Variação de tempo
$(\sigma - u_a)$		Tensão normal
$\nabla \emptyset$		Gradiente hidráulico
$\phi$		Diâmetro
$\lambda_i$		Fatores de ponderação
$\emptyset'$	Ângulo de atrito interno às variações no termo $(\sigma - u_a)$ , quando $(u_a - u_w)$ é mantido constante	

## 1- INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o crescimento desordenado e sem planejamento vem se somando às deficiências pré-existentes em áreas urbanas e periurbanas, especialmente no que tange a infraestruturas como saneamento, abastecimento e transporte. Não parece haver, infelizmente, uma preocupação marcante com a vida e sua qualidade.

Atualmente, várias problemáticas humanas se maximizam transformando-se em verdadeiras catástrofes socioambientais quando associadas a eventos climáticos. Em diversas épocas do ano, destaca-se nos noticiários nacionais a necessidade de maiores cuidados com o meio ambiente, haja vista que esse se expressa de diversas formas e sempre buscando o equilíbrio quando rompido. Com isso, é demonstrada a incompatibilidade de certas atividades humanas com o equilíbrio ambiental, podendo ser citada a inadequada ocupação e mau uso do solo. Cabe destacar que muitos problemas urbanos, como é o caso das inundações, têm geralmente origem situada nas áreas rurais. Enquanto nas áreas rurais o escoamento superficial é facilitado por manejos inadequados, nas urbanas o grande problema é o excesso de impermeabilização da superfície do solo. Surge então como consequência a necessidade de disciplinar a ocupação e o uso do solo em áreas rurais e urbanas, buscando-se favorecer o equilíbrio do balanço hídrico pré-existente por meio da infiltração planejada das águas pluviais.

Visando minimizar estes efeitos negativos, existem diversas técnicas na literatura e na engenharia que buscam a adequada destinação dos fluxos de águas superficiais, algumas não estruturais, por exemplo, a educação ambiental, e outras estruturais, por exemplo, as galerias de drenagem. Entretanto, enquanto as ações não estruturais são muitas vezes relegadas a um segundo plano, as técnicas estruturais convencionais usualmente apresentam restrições técnicas, econômicas, ambientais e sociais. Diante disto, surgem, por um lado, a busca de maior ênfase na educação ambiental por meio da popularização da ciência e, por outro, as propostas de técnicas de estruturas alternativas de compensação de fluxos. Nesse caso, busca-se compensar na fonte a parcela que seria infiltrada naturalmente mas que, por meio de impermeabilizações diversas, somou-se ao fluxo superficial. Nesse diapasão, surgem as trincheiras de infiltração como uma opção a ser viabilizada técnica e economicamente juntamente com outras alternativas como as valas e os poços de infiltração.

## **1.1- DELINEAMENTO DO ESTUDO**

Esta pesquisa estuda, por meio de modelos físicos de campo, a utilização de trincheiras de infiltração, aqui chamadas de células de infiltração como uma alternativa para prevenção de inundações e erosões provocadas por água de chuva. Na confecção das trincheiras de infiltração, foram utilizadas garrafas Pet (Politereftalato de etileno) como material alternativo para avaliação comparativa de desempenho com o uso de sistemas convencionais construídos com agregado graúdo e tijolos em crivo. Destaca-se, ainda, que os sistemas com garrafas Pet recebem uma cobertura de areia seguida de brita. As garrafas Pet são produzidas em grande escala pela indústria para diversas finalidades, devido à sua resistência satisfatória, ao seu baixo peso e a sua maior capacidade de armazenamento, características úteis para otimizar o volume escavado, como de armazenamento, previnem o colapso do solo natural subjacente à trincheira, o que afeta a capacidade de infiltração natural do solo.

No presente estudo, buscou-se entender o processo de infiltração sob diversos aspectos, avaliando não apenas a infiltrabilidade da água no solo, como também os problemas geotécnicos e ambientais que podem advir dessa prática. Como problemas geotécnicos, destacam-se os riscos de colapso estrutural e a subsidência do solo, os quais podem afetar obras de engenharia como edificações e rodovias.

Em relação ao dano ambiental, cabe destaque ao risco de erosão interna, o qual muitas vezes é responsável por graves problemas em regiões tropicais, devido à própria natureza do solo, às precipitações intensas e à contaminação das águas subterrâneas.

Pretendeu-se estabelecer critérios para as técnicas de infiltração que evitem tais problemas e que assegurem recarga de freáticos, a preservação dos mananciais, a prevenção de processos erosivos e de inundação, e a redução do custo dos sistemas de drenagem de águas pluviais ao se reduzir o fluxo superficial.

## **1.2- OBJETIVOS**

O objetivo geral desta pesquisa é verificar a infiltrabilidade dos solos de Brasília e os seus reflexos no comportamento mecânico do solo por meio da construção de estruturas de infiltração utilizando material alternativo, comparativamente ao uso de materiais convencionais. Foram levadas em consideração as especificidades pluviométricas, de clima e

de solo de uma área localizada na cidade de Brasília no Distrito Federal, onde foram implantados os dispositivos de infiltração na forma de trincheiras de infiltração, o Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.

Em termos específicos, esta pesquisa teve por objetivo estudar o solo da área determinada averiguando como a infiltração nele se processava diante de situações iniciais distintas quanto à umidade do solo e, por consequência, à sucção. Objetivou-se, ainda, estudar se a configuração e/ou o estado das garrafas Pet intervinham no processo de infiltração e na deformabilidade dos arranjos. O estudo conta com o monitoramento de uma estação meteorológica situada na área de estudo e pertencente ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília.

Buscando esclarecer os caminhos seguidos para o cumprimento dos objetivos desta pesquisa, apresenta-se o fluxograma da Figura 1.1 concernente ao conteúdo desta tese.

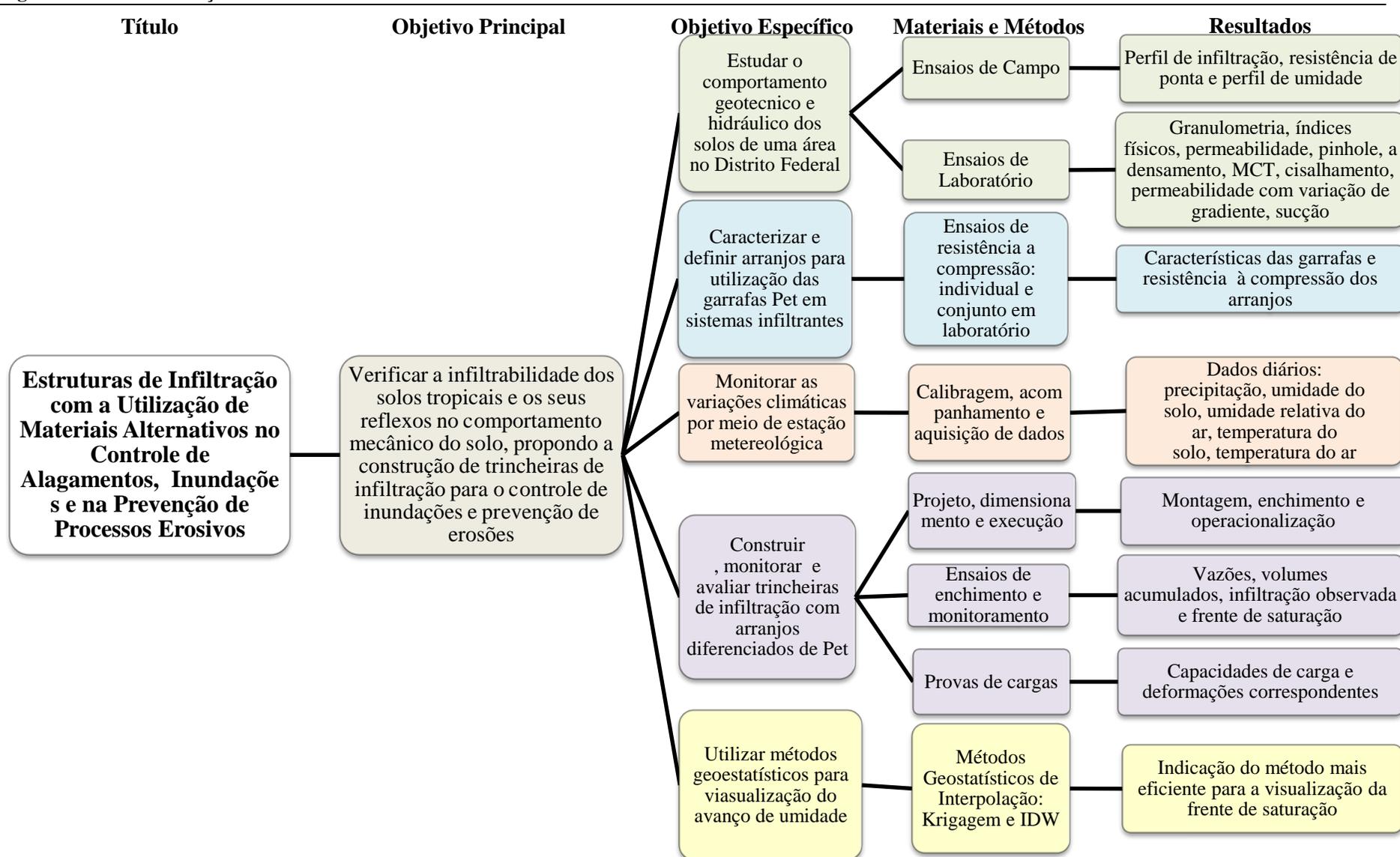


Figura 1.1 – Fluxograma das atividades realizadas.

### 1.3- ESCOPO DA TESE

Para atingir os objetivos traçados na seção anterior, a tese organizou-se em cinco capítulos, descritos sucintamente de acordo com o conteúdo de cada um.

O Capítulo 1 contém a introdução, o delineamento do estudo, os objetivos e o escopo da tese.

O Capítulo 2 contém a revisão bibliográfica a respeito de conceitos de água e solo, de impacto da urbanização nos sistemas de drenagem, de sistemas de infiltração, dinâmica da água no solos, solos colapsíveis, da utilização de material reciclado tipo PET e geoestatística.

O Capítulo 3 apresenta os materiais e métodos empregados na pesquisa. Iniciou-se pela identificação da área de implantação das trincheiras, caracterização dos ensaios de campo e de laboratório, a metodologia de construção das células experimentais, instrumentação de campo, ensaios de enchimento, provas de cargas, monitoramento da estação meteorológica e o tratamento estatístico dos dados.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos: ensaios para reconhecimento da área, ensaios de laboratório, dados da estação meteorológica, ensaios de permeabilidade em furos de sondagem com monitoramento do perfil de umidade, caracterização dos arranjos, ensaios de enchimento e os dados dos instrumentos de monitoramento e as provas de cargas.

No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões inerentes aos assuntos tratados nos capítulos anteriormente descritos, como também estão presentes algumas sugestões para pesquisas futuras.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no decorrer da pesquisa e os apêndices.

## 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1- CONCEITOS DE ÁGUA E SOLO

O ciclo hidrológico ou ciclo da água é um conceito muito importante na hidrologia. É o fenômeno global de circulação contínua da água nos seus diferentes estados físicos (sólido, líquido e gasoso), que ocorre entre a hidrosfera e a atmosfera. Este movimento permanente é impulsionado pela energia do Sol associada à gravidade, à rotação terrestre, ao efeito do vento e pelo potencial de retenção da água no solo. A energia solar aquece a água superficial resultando na sua evaporação e esse vapor de ar condensa-se formando as nuvens. Com isso, a gravidade faz com que a água condensada volte à superfície em forma de precipitação. Uma vez na superfície, a água circula podendo escoar por sobre o solo até atingir cursos d'água ou infiltra nos solos e rochas, por meio de poros, fissuras e/ou fraturas, umedecendo-os e alimentando os aquíferos subterrâneos. Parte da água que se infiltra no solo é absorvida pelas raízes das plantas (vegetação), e que por meio da transpiração, é devolvida à atmosfera. O equilíbrio desses fatores é denominado balanço hídrico (Figura 2.1).



Figura 2.1 – Ciclo hidrológico (Cola Web, 2011).

Um dos fatores condicionantes no ciclo da água, relacionado à infiltração e ao escoamento, é o solo e o perfil que ele apresenta. A parte superior da crosta terrestre é normalmente porosa devido ao constante intemperismo das rochas na formação dos solos. Essa faixa da litosfera é

composta por partículas de solo e poros (espaço entre as partículas de solo) preenchidos de água ou água e ar, dependendo da profundidade (Figura 2.2). A vegetação situa-se no topo dessa zona denominada zona não saturada ou de aeração, ou seja, onde os poros estão parcialmente preenchidos com água.

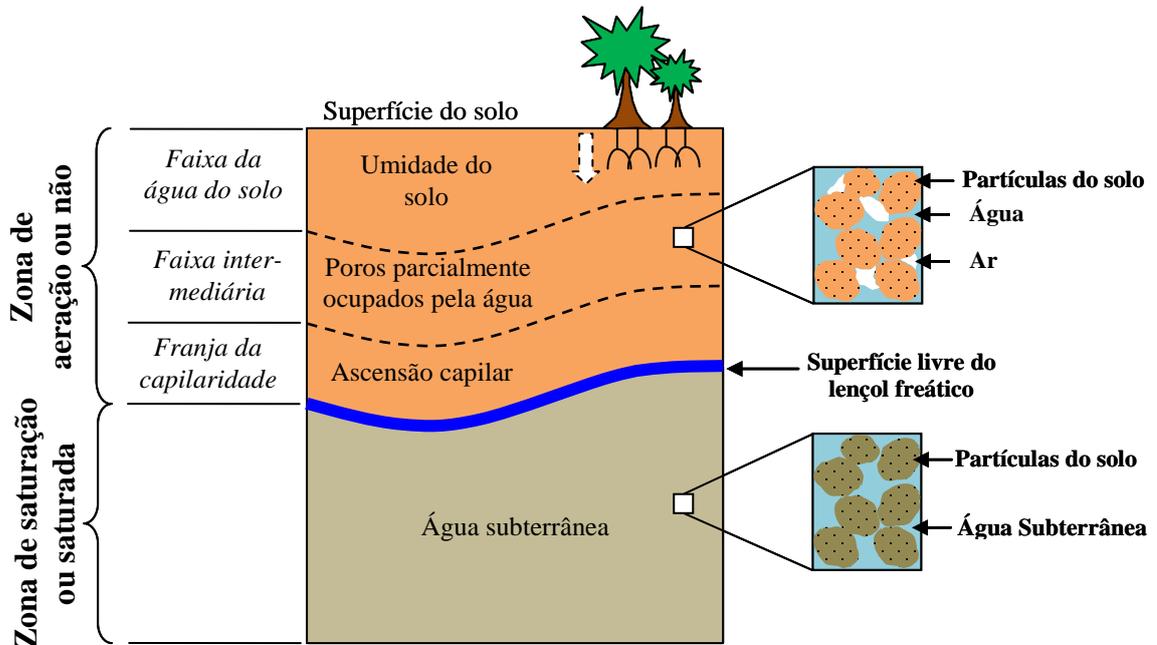


Figura 2.2 – Zonas passagem da água no solo.

A zona não saturada ou de aeração é dividida em faixas que destacam atuações distintas da água, como: a faixa de água no solo ou de umidade do solo (apresenta a atração molecular retendo a água em uma película sobre a superfície da partícula sólida e só permitindo seu deslocamento vertical quando alcança a saturação da capacidade de retenção), a faixa intermediária e a franja de capilaridade (que mantém a água acima do nível freático pela ação da capilaridade, opondo-se a ação da gravidade). Seus limites não são bem definidos e há uma transição gradual de uma para outra.

A água precipitada não absorvida pelas plantas, por gravidade, continua a infiltrar-se até atingir a zona denominada de saturada. A água entra na circulação subterrânea e contribui para a recarga dos aquíferos. O topo da zona saturada corresponde ao nível freático. No entanto, a água subterrânea pode ressurgir à superfície em forma de nascentes e alimentar as linhas de água ou descarregar-se diretamente no oceano. Na zona de saturação, encontram-se as águas da superfície que constituem a água subterrânea, cujo movimento se deve também à

ação da gravidade, obedecendo às leis do escoamento subterrâneo. Destaca-se a atuação da pressão hidrostática.

## 2.2- DINÂMICA DA ÁGUA

### 2.2.1- POTENCIAL DE ÁGUA NO SOLO

Segundo Reichardt (1985), o potencial matricial decorre de forças capilares e de adsorção que ocorrem devido à influência mútua entre a água e as partículas sólidas. Esse potencial foi também denominado potencial capilar, tensão da água no solo, sucção ou pressão negativa.

Experimentalmente, há inúmeras maneiras de medir a influência do conteúdo de água no solo sobre o potencial da água. Por isso, como forma de ilustrar cada método e suas características principais, seguem na Tabela 2.1 os métodos de medição de potencial de água no solo.

Tabela 2.1 – Métodos de medida de sucção (Silva, 2005).

<b>Método de Sucção</b>	<b>Faixa de Medida e tempo aproximado de equilíbrio</b>	<b>Observações</b>
Funil de pedra porosa	0 a 70 kPa (horas)	- sucção é aplicada diretamente a amostra; - bom para baixas sucções onde a precisão da câmara é limitada.
Câmara de pressão (matricial)	0 a 1.500 kPa (dias)	- empregada a técnica de translação de eixos; - capacidade da pedra porosa (pressão de entrada de ar); - continuidade da fase de ar.
Tensiômetro	0 a 70 kPa (minutos)	- tempo de resposta: depende da condutância da pedra porosa; - tensiômetros baseados em princípio osmóticos.
Papel filtro	50 a 30.000 kPa (7 dias)	- contato com o solo; - necessidade de calibração do papel filtro; - não formação de fungos; - pesagem (precisão de 0,0001 g).
Princípios osmóticos	200 a 1.600 kPa (horas)	- solo em contato com solução com concentração conhecida através de membrana seletiva; - solução de Polietilenoglicol (PEG); - útil para instalar e controlar sucção em ensaios.

O tensiômetro é um instrumento desenvolvido por Gardner em 1922 e que fornece a tensão com que a água está retida pelas partículas e poros e canalículos presentes no solo, fenômeno também conhecido por potencial matricial.

É um instrumento muito utilizado, principalmente, nos setores agrícolas. A Embrapa (1999) afirma que o manejo correto de irrigações utilizando tensiômetros determina reduções entre 25% e 40% da lâmina de água comparativamente com manejos sem critérios. Isso ocorre porque controla-se, diretamente no solo, as porções de água existentes, informando o momento em que as raízes de uma determinada cultura passa do estado úmido (capacidade de campo) para o seco (ponto de murcha permanente), evitando-se assim exaustos (e consequentes perdas) de água ou mesmo a morte de uma plantação por falta d'água. Esse acompanhamento pode ser realizado, indiretamente, por meio de medidas da tensão em que a água se encontra retida no solo. Essas medidas podem ser facilmente feitas utilizando-se o tensiômetro.

Na geotecnia, o tensiômetro é um instrumento de medição direta da poropressão negativa/sucção matricial/ tensão de água no solo, e de forma indireta da umidade do solo.

O tensiômetro utilizado por Richards & Neal (1936) era composto basicamente por uma membrana porosa (a qual consiste na parte sensível do equipamento) e de um medidor de pressão capaz de medir a energia com que a água é retida no solo, conectados por uma tubulação, mantida a vedação do sistema.

Segundo Coelho (2003), o princípio de funcionamento do tensiômetro baseia-se na formação do equilíbrio entre a solução do solo e a água contida no interior do aparelho. O equilíbrio ocorre quando a cápsula porosa entra em contato com o solo e a água do tensiômetro entra em contato com a água do solo. No início, a água dentro do tensiômetro está sob pressão atmosférica. Caso a água do solo esteja sob tensão, ela exerce uma sucção sobre o instrumento retirando água de dentro dele, fazendo com que sua pressão interna diminua. Como o instrumento é vedado, ocorre a formação do vácuo e a leitura desta pressão negativa fornece o potencial do solo, sendo que a permeabilidade do copo cerâmico depende do tamanho dos seus poros. Quanto mais permeável for o copo cerâmico, menor será o valor de entrada de ar. Isso indica que, quanto maior for a capacidade do copo cerâmico de manter o ar fora do sistema de medição, maior será o tempo para equilibrar a sucção interna com a sucção externa.

Os principais componentes de um tensiômetro, ilustrados na Figura 2.3, são: cápsula porosa de cerâmica ou porcelana, conectada a um medidor de vácuo (que pode ser vacuômetro metálico ou manômetro de mercúrio) por meio de um corpo plástico (devido a sua baixa

capacidade de condução de calor e por não ser corrosivo) preenchido com água e totalmente vedado.

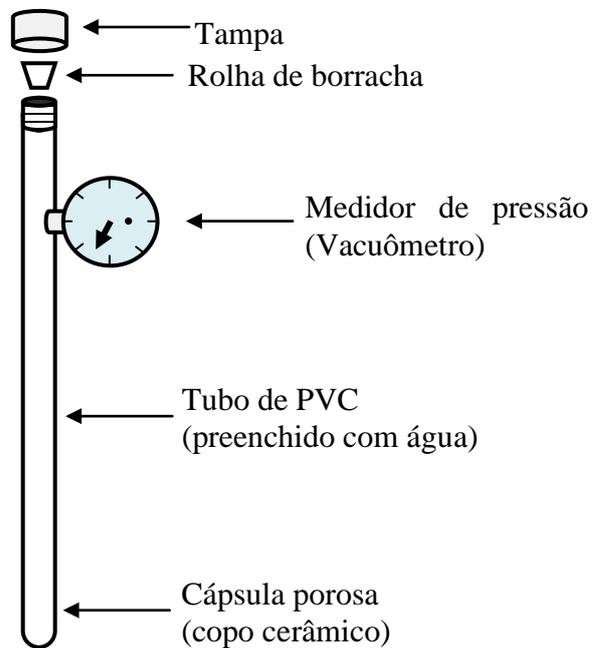


Figura 2.3 – Tensiômetro e seus componentes.

Segundo Fredlund (1993), o dispositivo de medição de pressão pode ser de três tipos: manômetro de mercúrio, manômetro de vácuo e transdutor elétrico de pressão (Figura 2.4).

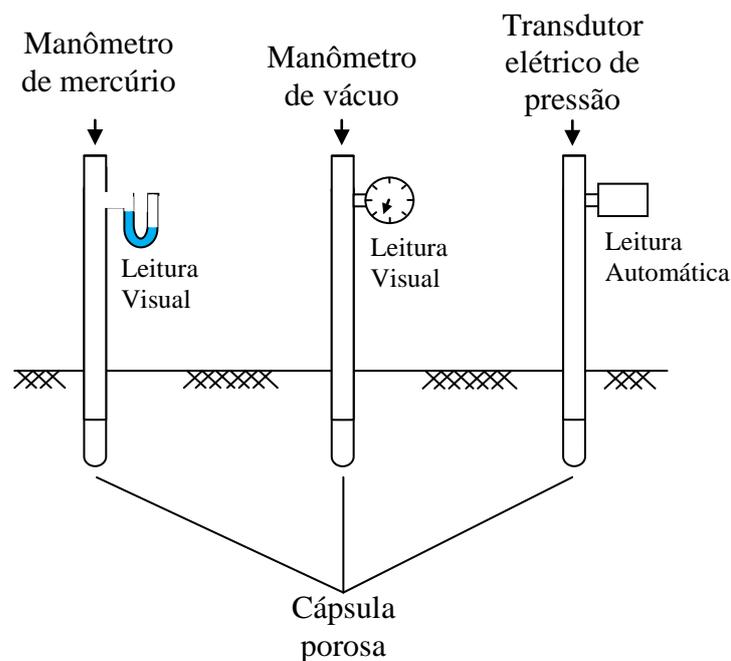


Figura 2.4 – Tipos de dispositivos de medição de pressão (Silva Junior, 2011).

O manômetro de mercúrio conectado ao tensiômetro é bastante utilizado, mas apresenta como desvantagens o difícil manuseio, a falta de comodidade e oferece riscos à saúde e ao meio ambiente. Como vantagens têm-se menor custo e não exige calibração. No entanto, devido a suas limitações, vem sendo substituído por outros dispositivos, seja de leitura manual, seja automática.

Os tensiômetros vacuômetros têm seu emprego mais recomendado para análises em campo, pois apresentam como vantagens a simplicidade e a facilidade de operação, quando comparado ao manômetro de mercúrio. Ressalta-se que os manômetros a vácuo podem medir tensões de 0 a 100 kPa. Segundo Marinho (1995), estes sensores são de fácil manutenção, porém apresentam baixa acurácia.

Os tensiômetros eletrônicos são caracterizados por apresentarem os transdutores de pressão (medidores automáticos de tensão interna), que são usados em conjunto com o tensiômetro para realizar as medidas de tensão dos solos em campo e em laboratório. Os transdutores permitem a substituição de medidores do tipo manômetro de mercúrio e vacuômetro, pois facilitam a coleta de dados, que é automática, utiliza-se de computador (para armazenamento) e coletor de dados ("datalogger") (Figura 2.5).

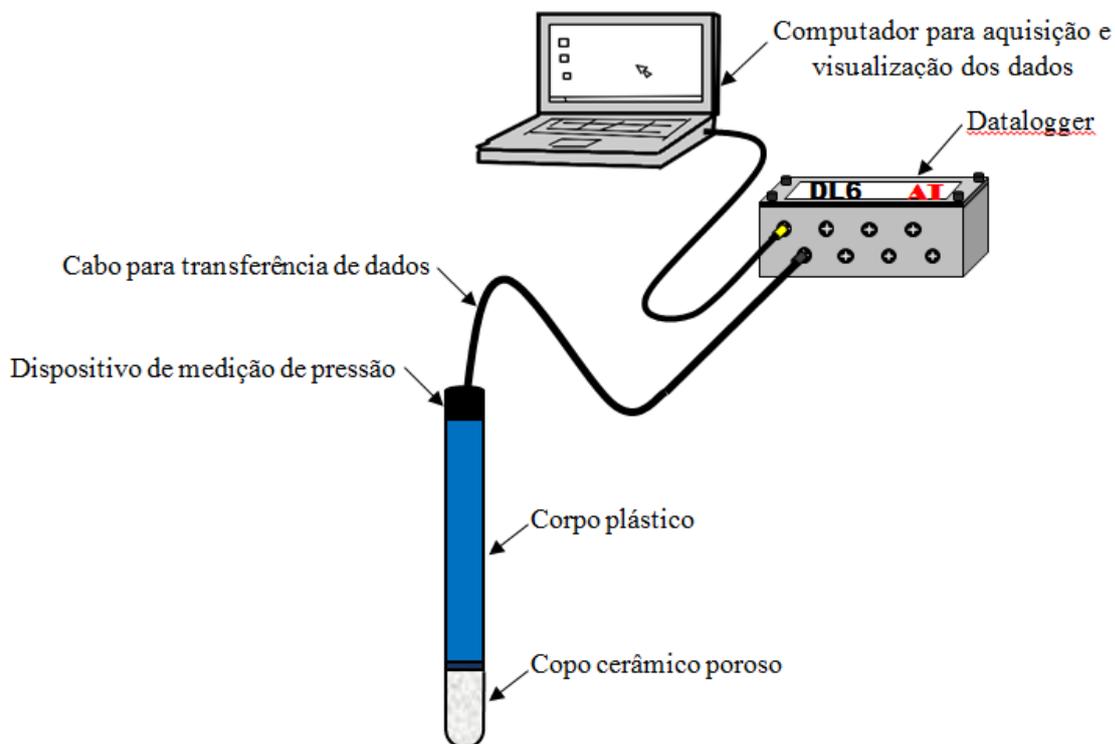


Figura 2.5 – Tensiômetro eletrônico e seus componentes.

A grande limitação do tensiômetro convencional é sua capacidade de medição que, em geral, vai somente de 0 a 90 kPa (Stannard, 1992). Esse patamar máximo (90 kPa) deve-se a expansão de microbolhas de ar que acontece dentro do sistema quando a água passa repentinamente da fase líquida para a fase gasosa, devido à queda de pressão. Esse fenômeno é comumente conhecido como cavitação.

Segundo Marinho & Chandler (1994), a ocorrência de cavitação pode ser evitada quando se usa água deaerada, evitando-se a saturação da água por ar. O procedimento de ferver a água é considerado como um método apropriado. No entanto, o contato da água com o ar pode em minutos saturar a água com ar. Jones, Overton&Trevena (1981) recomendam que o sistema deve ser submetido a vácuo para que seja removida a maior quantidade de ar possível aprisionado nas microcavidades, mas os próprios autores reconhecem que dificilmente todo ar será removido por este processo.

## **2.2.2- CÁLCULO DA ÁGUA NO SOLO**

Dois pontos estão intimamente ligados ao cálculo da água no solo: o conteúdo e a armazenagem de água no solo.

### **2.2.2.1- CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO**

O solo é um sistema complexo, constituído de sólidos, líquidos e gases. As partículas sólidas formam um arranjo poroso tal que os espaços vazios, denominados poros, têm capacidade de armazenar líquidos (em regra, água) e gases. A quantidade de água em relação à quantidade de sólidos no solo é denominada teor de umidade ou simplesmente umidade, dado imprescindível a qualquer análise que envolva as propriedades do solo, seja qual for a ciência. Existem vários métodos para se determinar tal teor de umidade, podendo-se citar a forma direta e a indireta de medição de tal parâmetro. A indireta, por não ter sido utilizada, não será aqui tratada.

A determinação da umidade do solo de forma direta pode ser feita utilizando o método gravimétrico. Esse método consiste basicamente na coleta de amostras de solo em campo e na determinação das suas massas úmida e seca. A massa úmida é a correspondente às condições em que a amostra foi coletada e a massa do solo seco é determinada após a amostra ser submetida à secagem, em estufa (ou por outro método de secagem), até atingir um peso constante ou, no caso de uso da estufa, por no mínimo 24 horas. Para a obtenção dos valores

de umidade gravimétrica ( $w$ ) de uma amostra de solo, relaciona-se a massa da água e a dos sólidos contidos na amostra em estudo, por meio da massa natural ou total (sólido+água) e da massa seca do solo (sólidos) (Equação 2.1). É importante pontuar, que essa umidade determinada para o solo é uma considerada global. Nos materiais como os solos argilosos profundamente intemperizados, em que a distribuição de poros é bimodal, torna-se importante levar em conta a distribuição de umidade em relação aos poros (CAMAPUM DE CARVALHO, 2007).

$$w(\%) = \frac{M_w}{M_s} = \frac{M_t - M_s}{M_s} \quad (2.1)$$

Onde:

$M_w$  – Massa de água;

$M_t$  – Massa total (sólido + água + ar);

$M_s$  – Massa dos sólidos (solo seco).

Segundo Leyet. *al.* (1994), o método gravimétrico tem como limitações a morosidade da obtenção dos resultados, já que, apesar de esse método ser o mais preciso, oferece como limitação o fato de fornecer o valor da umidade somente 24 horas após a amostragem, além da necessidade de intensa mão-de-obra. A grande vantagem deste método é o fato de necessitar de instrumentação simples e permitir fixar a precisão em função das características de precisão da balança. Talvez por isso seja adotado como padrão.

### **2.2.2.2- ARMAZENAMENTO DA ÁGUA NO SOLO**

O valor de armazenamento de água no solo, expresso em termos de altura de água, representa a quantidade de água existente em qualquer camada do solo. Numericamente, esse valor é dado pelo produto entre a umidade e a profundidade do solo. Porém, em condições reais, onde o conteúdo de água do solo não é o mesmo para as várias camadas constituintes do solo, ele é dado pelo somatório entre o produto dos incrementos do perfil de solo e seus respectivos conteúdos de água. No que se refere aos dispositivos de infiltração, um cálculo que pode ser obtido através da armazenagem de água no solo que é a infiltração acumulada.

### **2.2.3- INFILTRAÇÃO**

Denomina-se infiltração o processo dinâmico pelo qual a água no estado líquido atravessa a superfície do solo. A modelagem desse processo é de grande importância prática, pois a taxa

de infiltração é um dos fatores que mais influencia o escoamento superficial. Assim, o conhecimento do processo de infiltração fornece importantes subsídios para o dimensionamento de reservatórios, estruturas de controle de erosão e de inundação, canais e sistemas de irrigação e drenagem.

A infiltração é representada por duas variáveis: a taxa de infiltração e a infiltração acumulada. A taxa de infiltração é igual à densidade de fluxo, correspondendo ao volume de água que infiltra na unidade de área e de tempo. A infiltração acumulada corresponde ao volume (por unidade de área) de água infiltrada ao longo do tempo. De forma generalizada, o comportamento de ambas segue o esquema da Figura 2.6.

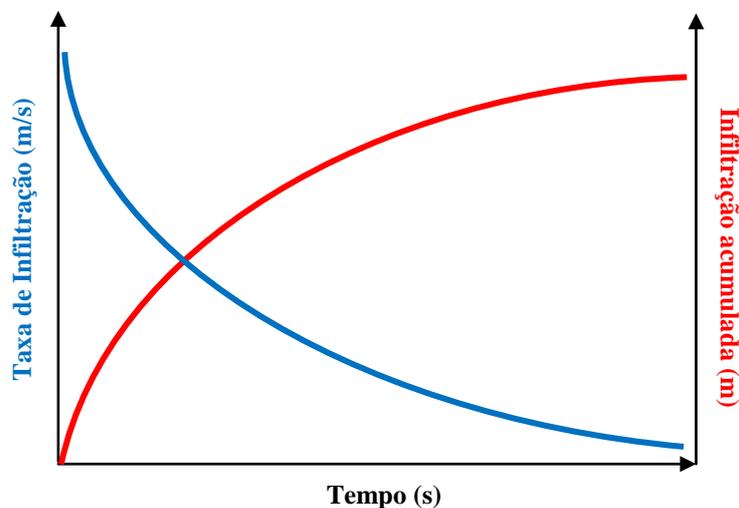


Figura 2.6 –Taxa e infiltração acumulada ao longo do tempo para um mesmo solo.

Objetivando a caracterização hidrogeotécnica dos terrenos naturais, são correntemente realizados em Geologia de Engenharia os ensaios de permeabilidade em campo, os quais têm a finalidade de determinar os coeficientes de permeabilidade dos solos. Podem ser aplicados em poços de inspeção, em cavas abertas e em furos de sondagem a trado e a percussão. No último caso, faz-se o ensaio conhecido de forma genérica como “ensaio de infiltração”.

Os ensaios de permeabilidade em campo podem ser realizados a carga hidráulica externa constante ou a carga hidráulica externa variável, observando-se o diferencial de pressão positivo (carga) e negativo (descarga) aplicados ao aquífero. Utiliza-se, a expressão “carga hidráulica externa”; pois, em mantos de solo não saturados, como é o caso, ocorre paralelamente à infiltração, variação da carga hidráulica interna devido a variações de sucção.

Em furos de sondagens, os ensaios podem ser realizados em dois níveis. À nível constante, desde que seja mantido o nível d'água numa posição constante ao longo de toda duração do ensaio, caracterizado como: ensaio de infiltração (se for por introdução de água medindo-se a vazão injetada) e por ensaio de bombeamento (se for por retirada de água medindo-se a vazão bombeada). À nível variável, desde que o nível d'água altere para uma posição que se possa denominar nível inicial do ensaio e que a tendência do nível d'água volte à posição original seja acompanhada ao longo do tempo de ensaio, caracterizado como: ensaio de rebaixamento (se for por introdução de água medindo-se a velocidade de rebaixamento) e por ensaio de recuperação (se for por retirada de água medindo-se a velocidade de recuperação).

O regime de escoamento é um dos condicionadores da validade dos ensaios, visto que a vazão retirada ou infiltrada, no caso de solos saturados, ou absorvida e infiltrada, no caso de solos não saturados é utilizada no campo como uma forma de controlar esse regime. Quando essas vazões permanecem constantes ao longo do tempo, pode-se dizer que se atingiu um regime permanente de escoamento. Dessa forma, a vazão torna-se a variável utilizada na maioria das formulações que determinam os coeficientes de permeabilidade. Cabe destacar que, embora no caso de solos não saturados ela tenda a uma constante devido ao aumento da distância entre o ponto de infiltração onde a sucção é aproximadamente nula e a frente de saturação onde a sucção é a do solo natural. Com isso, tem-se uma tendência ao gradiente de energia hidráulica interna tender para zero à medida em que ocorre a infiltração da água no solo.

A Equação 2.2 determina o coeficiente de permeabilidade pelo método de rebaixamento sem revestimento lateral do furo de sondagem.

$$k = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2 \quad (2.2)$$

Onde:

R = Raio de Influência, (determinado pela equação  $R^2 + R - h = 0$ );

r = Raio do furo de sondagem;

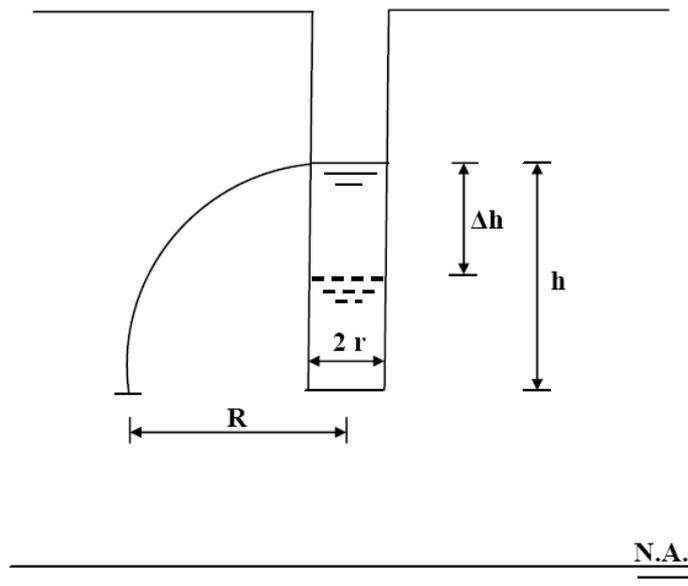
$\Delta h$  = Variação da coluna d'água;

h = Altura da coluna d'água

$\Delta t$  = Variação do tempo;

Observa-se que esta equação geral não contempla a variação de energia interna, o que, pelo motivo exposto no parágrafo anterior, espera-se que não chegue, quando as leituras se estabilizarem, a constituir erro significativo no valor de permeabilidade determinado. Outros erros podem ser induzidos em sistemas bimodais de distribuição de poros, como é o caso dos solos tropicais profundamente intemperizados quando da infiltração o solo encontra-se em umidade inferior à de saturação dos microporos. Nesse estágio, o contato com a água de infiltração pode colocar esta água em tensão negativa importante passando a intervir no fluxo.

A relação entre  $R$  e  $h$  foi obtida supondo-se que o escoamento se faz segundo uma parábola cujo vértice está no centro do furo, na altura do nível d'água inicial ( $t = 0$ ). A Figura 2.7(Boletim N° 4 ABGE 1996) exemplifica o ensaio por rebaixamento em furo de sondagem, onde o lençol freático e a camada impermeável localizam-se em profundidades inferiores a do ensaio e os esses não interferem no processo de infiltração. Esses coeficientes são utilizados em ensaios que não possuam camisa impermeabilizadora, e nos quais a infiltração da água atua nas duas direções (H-horizontal e V-vertical).



N.A.

Figura 2.7 – Modelo do ensaio de permeabilidade pelo método de rebaixamento (Boletim N° 4 ABGE 1996).

#### 2.2.4- CILINDROS CONCÊNTRICOS

O ensaio do Infiltrômetro de cilindros concêntricos tem por objetivo a obtenção da taxa de infiltração na superfície do solo. É caracterizado por ser realizado com auxílio de dois

cilindros: um interno e um externo. A finalidade do externo é direcionar verticalmente o fluxo da lâmina d'água infiltrada pelo cilindro interno (Figura 2.8, Souza, 2002). Os cilindros são construídos em chapas de aço de 1,5mm de espessura, com diâmetros de 28 cm e 53 cm, cilindro interno e cilindro externo respectivamente e alturas iguais a 20 cm. O externo deve apresentar diâmetro suficiente para garantir que a infiltração ocorra verticalmente no interno.

Seguindo o manual de irrigação da UFV (1995), procedeu-se então à realização do ensaio controlando-se a infiltração ao longo do tempo. Anotou-se o tempo ( $\Delta t$ ) que água levava para infiltrar cerca de 2 ou 3 cm. Com o auxílio de uma régua graduada (mm), verificou-se a altura de coluna d'água, completando-se o restante do volume com água até o nível superior do medidor, anotando-se o tempo que a água levou do nível superior ao nível inferior.

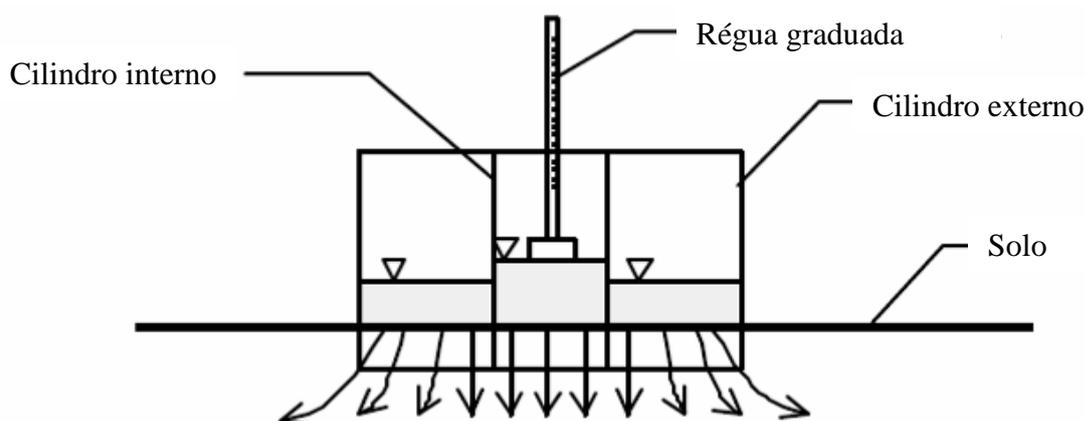


Figura 2.8 – Esquema de montagem do Infiltrômetro de Cilindros Concêntricos. (Souza, 2002).

Nos primeiros momentos, a taxa de infiltração foi relativamente alta, devido provavelmente ao fato de o solo estar inicialmente não saturado, e nele atuar certa sucção. Tal taxa tende a diminuir ao longo do tempo até a estabilização. Durante o ensaio, foram feitos vários controles de infiltração até que se obteve vazão que pode ser considerada constante pelo procedimento adotado. Os valores constantes obtidos no ensaio de infiltração caracterizam a taxa de infiltração média para um solo que pode no estágio final do ensaio ser entendido como em estado saturado. É necessário, porém, atentar para outro aspecto do fluxo por infiltração em um meio não saturado. Nesse estado quando a frente de infiltração avança no solo, o ar tornando-se prisioneiro, é colocado sob pressão positiva gerando redução na carga hidráulica

efetiva atuante neste caso no interior do anel e no caso de ensaios em poços na carga hidráulica atuante em seu interior.

### **2.2.5- ASPECTOS RELATIVOS AOS MECANISMOS DE INFILTRAÇÃO**

Os solos profundamente intemperizados, como é o caso do perfil de solo estudado, são compostos predominantemente por macro e microporos. Os microporos encontram-se majoritariamente integrando os agregados. Os macroporos são constituídos pelos espaços vazios existentes entre si. Nesses solos, enquanto a capacidade de armazenamento está diretamente ligada aos vazios totais nele presentes a percolação geralmente se restringe aos meso e principalmente aos macroporos devido à menor energia necessária para que ocorra o fluxo.

O movimento da água no interior do maciço está ligado a duas formas de energia: a gravitacional oriunda da coluna de água e considerada externa, e a correspondente ao potencial de sucção ou capilaridade e que é considerada interna. Essa energia interna pode ser oriunda das cargas de superfície dos minerais, forças de adsorção, energia de sucção, e/ou por forças de natureza capilar, energia capilar. Para entender o mecanismo de fluxo nos mantos de solos tropicais não saturados, faz-se necessário, portanto, entender a forma da curva característica de retenção de água desses solos, mas não apenas. É necessário também que se tenha algum entendimento acerca da microestrutura do solo e da mineralogia. Em um perfil de intemperismo, parte-se da rocha, passa-se pelas camadas de solo saprolítico, solos pouco intemperizados, pela transição, para, desta forma, atingir os solos profundamente intemperizados. A estrutura, a composição químico-mineralógica e a forma da curva característica, entre outros, serão, nos solos profundamente intemperizados, solos lateríticos, distintos daqueles dos solos pouco intemperizados, solos saprolíticos. O solo que comanda o processo de infiltração depende de fatores, que também, como no caso da energia, externos e internos. Externa a intensidade e distribuição das precipitações, a temperatura ambiente, a umidade relativa do ar, as características geomorfológicas, a cobertura do solo entre outros, embora quase sempre muitos desses não sejam considerados como elementos de avaliação, seja porque apresentam elevada variabilidade, seja porque se desconhece os seus reais efeitos. Quanto aos internos, têm-se fatores como a espessura do manto de intemperismo, do nível de intemperização por ele sofrido; a temperatura; a umidade inicial; a composição química do fluido residual, entre outros, igualmente poucos são os considerados. Aponta-se para o fosso

existente entre o que se mede e o que se conhece. Mas é preciso sair do campo da reflexão e partir para os resultados. Isso é que se faz a seguir, mas não sem antes tentar explicar como se dá o fluxo no solo pouco intemperizado e no solo profundamente intemperizado.

Nos solos profundamente intemperizados, deve-se, inicialmente, verificar se a umidade nele presente está ou não saturando os microporos, o que pode ser feito de modo estimativo conhecendo-se a umidade do solo e a umidade correspondente à entrada de ar nos microporos. Encontrando o solo em estado não saturado, o que não é comum, a água ao penetrar nele será captada pelos agregados devido à elevada sucção presente nos microporos. Estando saturado, a água fluirá pelos meso e macroporos. No entanto, se o volume de água que penetra no solo for grande o suficiente para atuar como uma frente de saturação, ela colocará o ar sob pressão que passará a atuar como uma barreira ao fluxo. Diante desses e de outros aspectos, não é difícil antever a importância da intensidade e da distribuição das precipitações no processo de infiltração.

Nos solos pouco intemperizados, o problema passa a ser mais de natureza química mineralógica que estrutural, muito embora a estrutura que caracteriza o solo seja fundamental para o fluxo. O ponto talvez mais relevante é buscar entender como se dá a movimentação da água no solo, seja a estrutura dispersa, seja floculada, não se podendo por certo negligenciar os efeitos da interação interpartículas no processo de fluxo. Cabe, inicialmente, destacar que esses solos encontram-se muitas vezes em estado saturado, abaixo do nível d'água e que, mineralogicamente, é comum possuírem, em sua composição, argilominerais expansivos, contrariamente ao que ocorre nos solos profundamente intemperizados. Encontrado em estado não saturado e nele presentes argilo-minerais expansivos, a água infiltrada só fluirá em sua totalidade pelos vazios inicialmente presentes no solo se os minerais forem impedidos de expandir. Expandindo, dois fenômenos vão ocorrer: parte da água penetrará na estrutura do mineral no processo de expansão e expandindo o mineral aumentará ou diminuirá o volume de vazios presentes no solo. Tudo depende de como ocorre o equilíbrio de energia (Campos *et al.* 2008).

Portanto, entender o perfil de solo é fundamental para que se compreenda o processo de infiltração. No presente estudo, o manto de intemperismo é espesso e os ensaios e estruturas de infiltração adotadas são pouco profundos é possível, então, entender que os resultados

obtidos dizem respeito tão somente ao comportamento dos solos profundamente intemperizados.

É preciso inicialmente considerar que o maciço durante o estudo está se submetendo a três processos de fluxo de água distintos: a infiltração oriunda das precipitações com movimento geralmente descendente a partir da superfície do terreno; o fluxo ascendente provocado pela evapotranspiração; o fluxo oriundo dos ensaios nos furos executados a trado com movimento predominantemente horizontal a partir das paredes do furo e vertical a partir do fundo do furo. Os dois primeiros fluxos da água definem a umidade do maciço sendo esta importante no processo de infiltração.

### **2.3- IMPACTO DA URBANIZAÇÃO NOS SISTEMAS DE DRENAGEM**

O grande crescimento dos centros urbanos e a expansão desordenada, sem planejamento urbanístico (sobretudo nas últimas décadas), agrava ainda mais as deficiências ocasionadas pela ocupação urbana. Em se tratando do ciclo hidrológico natural, esta ocupação provoca alterações motivando o colapso do balanço hídrico no habitat humano, conforme se pode observar nos noticiários mundiais.

O processo de urbanização gerador do adensamento populacional traz graves problemas à infraestrutura urbana, em sua maioria não planejada, para atender a demanda. Essa expansão, em detrimento da cobertura vegetal, ocasiona a impermeabilização da camada superficial do solo, o que modifica a ocorrência natural do ciclo hidrológico.

A impermeabilização do solo determina a quebra das proporções naturais (ciclo hidrológico), ou seja, parte da água que infiltrava e evaporava passa a compor o escoamento superficial ocasionando elevação da velocidade de escoamento, redução do tempo de concentração na bacia e na vazão de pico. Nos sistemas de drenagem, a impermeabilização influencia o aumento da vazão e dos volumes escoados, a frequência das inundações e a produção de sedimentos, a diminuição do tempo de escoamento da água além do carregamento cada vez mais intensivo das cargas poluentes para os corpos receptores.

A água também sofre alterações de qualidade ao longo das diferentes fases do ciclo hidrológico. A água salgada do mar é transformada em água doce pelo processo de evaporação. A água doce que infiltra no solo dissolve os sais encontrados e a água que esco

pelos rios carrega estes sais para os oceanos, bem como um grande número de outras substâncias dissolvidas e em suspensão.

A precipitação e o escoamento são duas componentes muito importantes nos estudos de bacias hidrológicas e no dimensionamento de sistemas de drenagem de águas pluviais em zonas urbanas. Com a interrupção de componentes como a infiltração e a evapotranspiração (transpiração + evoporação), ocasionadas pela impermeabilização da superfície e pelo desmatamento, o dimensionamento de bacias e de sistemas de drenagem torna-se insuficiente para receber o volume ora direcionado por esses componentes. Podemos citar, como consequências, inundações com prejuízos materiais e de vida humana; poluição dos meios receptores e da água subterrânea; degradação da qualidade ambiental para a fauna e a flora; e impactos climáticos, sociais e econômicos.

Alguns estudos (Tabela 2.2) comprovam o aumento das vazões de pico em relação à vazão normal nas áreas urbanas, determinando acréscimos de volumes significativos nos núcleos urbanos que exigem uma maior capacidade de escoamento dos sistemas de drenagem.

Tabela 2.2 –Estudos do acréscimo da vazão de pico devido impermeabilização do solo.

País	Autor	Ano	Vazão de Pico em relação à Vazão Natural
África do Sul	Braune e Wood	1999	3 a 4 vezes
Brasil	Silveira	1999	6 vezes
Estados Unidos	Roesneret <i>al.</i>	2001	2 ou mais vezes

## 2.4- SISTEMAS CLÁSSICOS DE DRENAGEM

Durante muito tempo as estruturas de drenagem urbana eram concebidas levando em consideração os pensamentos higienistas do século XIX, os quais preconizavam a rápida evacuação das águas dos locais onde haviam sido originadas, buscando com isso a diminuição da ocorrência de doenças de veiculação hídrica decorrentes da água parada ou empoçada, sujeita à contaminação. O nascimento do conceito ambiental reconheceu a poluição do esgoto pluvial, determinando pressão para que todos os esgotos fossem tratados.

Os sistemas clássicos são basicamente constituídos pelas sarjetas que transportam águas superficiais nas ruas, pelas bocas de lobo que captam o escoamento quando a vazão é

superada, e pelos condutos que transportam as águas até o desague ou até os sistemas de macrodrenagem. A drenagem urbana convencional atua na eliminação rápida da água pluvial, de maneira a, muitas vezes, transferir a cheia para outras áreas e provocar as inundações. Segundo Brito (2006), com a intensificação do processo de urbanização, observada ao longo da segunda metade do século XX, os sistemas clássicos começaram a apresentar limitações em relação a sua eficácia. O princípio de funcionamento pela transferência das águas para jusante o mais rapidamente possível era uma das causas de inundações a jusante, o que sugeria a construção de novas obras de drenagem, em geral de elevado custo. Além disso, as obras de canalização dos cursos d'água davam uma falsa ideia de segurança contra inundações, fazendo com que as pessoas de baixa renda ocupassem as áreas ribeirinhas, resultando em perdas de vidas e prejuízos econômicos (Baptista et.al 2005).

Segundo Nascimento *et.al.* (1997), os sistemas clássicos tendem a ampliar os impactos da urbanização sobre os processos hidrológicos. Citam-se, como consequência, a obsolescência das redes de drenagem, o aumento da frequência de inundações e a poluição dos corpos d'água, com repercussões econômicas, sociais, ambientais e políticas.

O conceito de tecnologias alternativas de drenagem surge como uma nova abordagem na drenagem urbana, a partir dos anos 70, buscando compensar os efeitos da urbanização no ciclo hidrológico. Conhecidas como alternativas ou compensatórias, elas têm como premissas a retenção e infiltração das águas precipitadas antes que esse volume se some ao escoamento, tornando o problema de difícil solução. Os sistemas pontuais, destinados para maximização dos volumes infiltrados, buscam compensar os componentes de infiltração do balanço hídrico. Tais métodos estão diretamente relacionados com o tipo de solo, a precipitação, a altura do nível freático, a cobertura vegetal, a área disponível para infiltração e o armazenamento de água.

## **2.5- SISTEMAS ALTERNATIVOS DE DRENAGEM**

Segundo Baptista *et. al.*, 2005, as técnicas compensatórias surgem para atuar na retenção e na infiltração das águas precipitadas possibilitando ganhos na qualidade das águas pluviais. Os mesmos autores citam a classificação das técnicas compensatórias: não estruturais, que atuam no retardamento do escoamento (revestimento de canais e pavimentos rugosos, controle na fonte, etc.) e, estruturais, que permeiam as técnicas de retenção e infiltração e se diferem,

principalmente, pela geometria e pela capacidade de captação do volume escoado (trincheiras, colchões drenantes, valetas, valas, poços de infiltração, etc).

Além de uma relação harmônica de custo e benefício, redução do volume de escoamento superficial, ganho paisagístico, possibilidade de recarga do lençol freático e melhoria da qualidade das águas pluviais, os sistemas ainda permitem que o espaço seja utilizado para outras atividades (Figura 2.9). Alguns autores, como Baptista *et. al.* (2005), citam como inconvenientes do sistema a necessidade de manutenção periódica, as restrições de eficiência em áreas de forte declive e o risco de poluição do lençol freático.

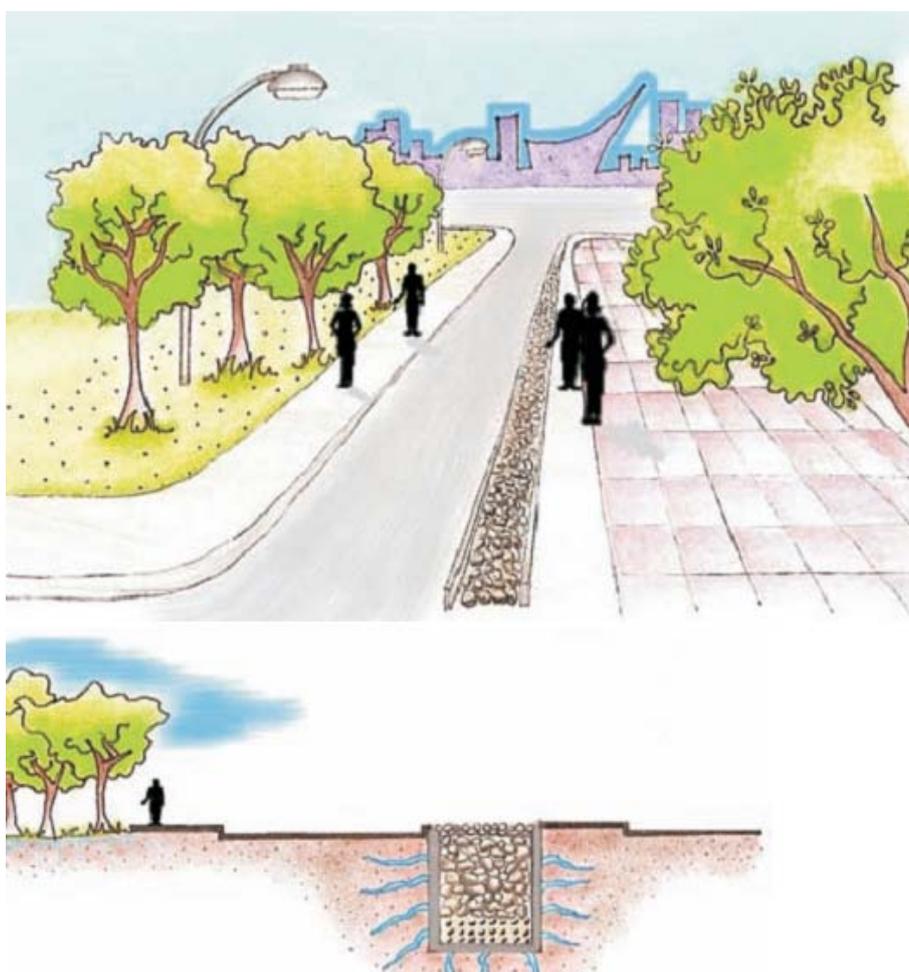


Figura 2.9 –Disposição de trincheiras de infiltração. (Camapum de Carvalho &Lelis, 2010)

A adoção dos sistemas alternativos está condicionada a um grande número de fatores ligados às características hidrológicas locais, ao seu efetivo impacto sobre os processos hidrológicos na bacia, à sua integração com o planejamento urbanístico, à adoção de novas práticas de manutenção e aos custos de implantação e de manutenção.

Um dos sistemas mais utilizados, levando em consideração os condicionantes citados anteriormente, são as trincheiras de infiltração. Possuem como características principais a profundidade superior à largura (utilizando as paredes como áreas de infiltração horizontal), um sistema linear caracterizado pelo comprimento infinitamente superior à altura e à largura, podendo ser disposto em vários lugares distintos (praças, ruas, condomínio) desde que observados os critérios de infiltração do local.

### **2.5.1- TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO**

As trincheiras de infiltração (percolação e/ou drenantes) são estruturas que permitem armazenar a água precipitada por tempo suficiente para a sua infiltração no solo, favorecendo a redução dos volumes escoados e das vazões máximas de enchentes (Azzoutet *al.*, 1994; Baladeset *al.*, 1998). Elas devem ser implantadas a montante do sistema de drenagem pluvial convencional e são caracterizadas por atuarem pontualmente, ou seja, serem dispositivos de controle de escoamento na fonte. Esses têm o objetivo de captar, armazenar e infiltrar uma parcela do escoamento superficial gerado em uma pequena área e nela mesma atuar com o processo de infiltração, reduzindo o volume de água pluvial que chega até as galerias e retardando os picos do hidrograma de cheias.

Pode-se citar dois grupos de trincheiras de infiltração: as superficiais e as subterrâneas. As superficiais são utilizadas em locais que possuem pequena área de captação de escoamento, caracterizados por apresentarem uma reduzida quantidade de sedimentos e óleos que podem ser retidos por filtro de areia ou mesmo grama, suas dimensões determinam-se mínimas para atender o armazenamento e a infiltração dos volumes escoados, podendo ser implantadas em áreas residenciais. As subterrâneas caracterizam-se pela profundidade, pois recebem maiores quantidades de volumes escoados oriundos de estruturas de drenagem, exigindo, dessa forma estruturas especiais de entrada que objetivam a retenção dos sedimentos e dos óleos.

As trincheiras são escavadas no solo de tal forma que caracteriza uma estrutura linear na qual o comprimento prepondera sobre a largura e profundidade; são geralmente constituídas por valetas preenchidas, ou não, por material granular graúdo (seixo rolado, brita, etc.) de porosidade em torno de 30 a 40%, e um geossintético do tipo geotêxtil envelopando o material de enchimento colocado entre a trincheira e o solo. O geossintético tem como função impedir a entrada de material fino na estrutura que pode ocasionar precoce colmatação do sistema, e realizar filtração anticontaminante. Na superfície das trincheiras, usualmente,

utiliza-se material permeável granular ou mesmo grama para proteger o geotêxtil que envolve o enchimento da célula (Figura 2.10).

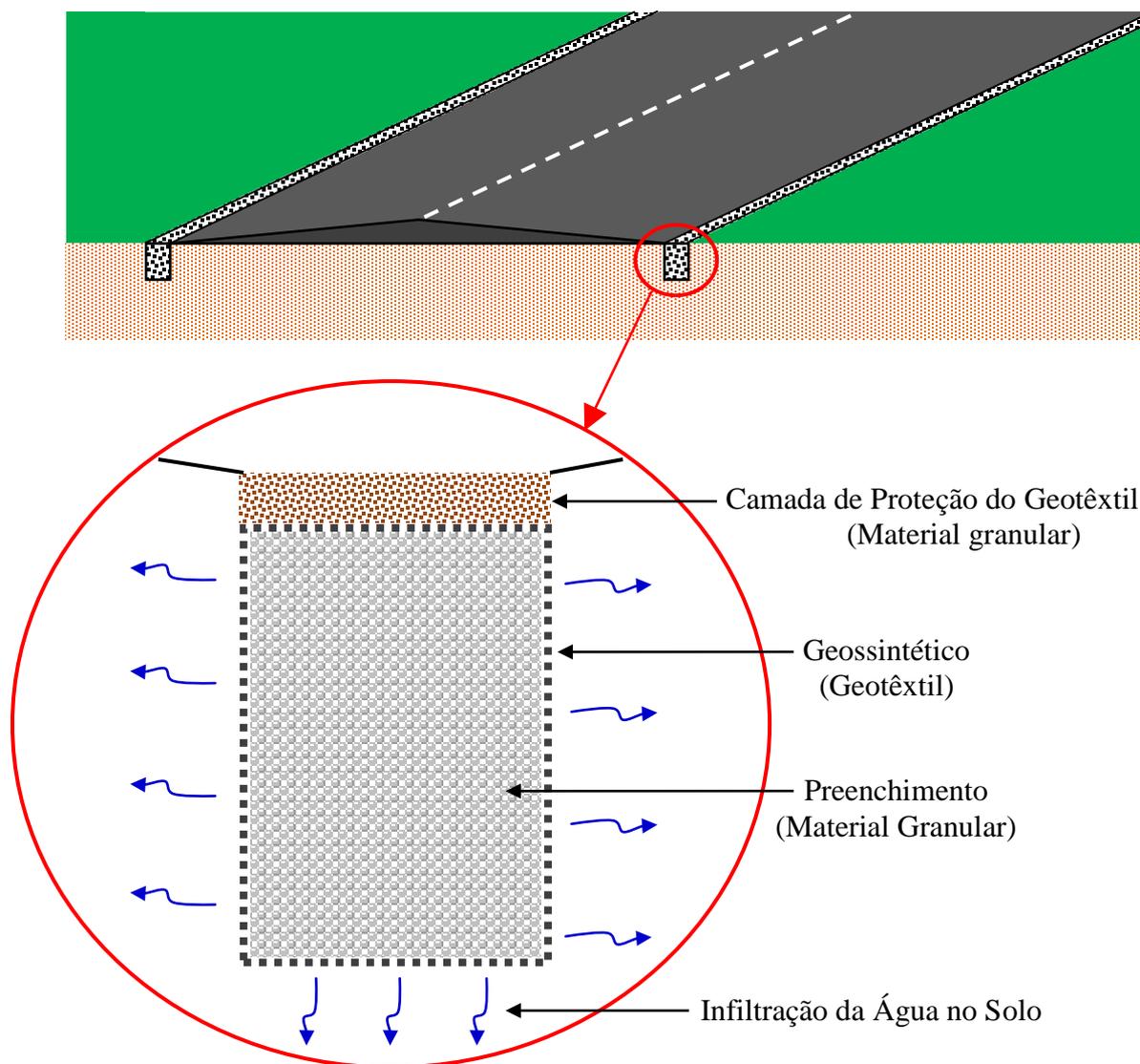


Figura 2.10 – Ilustração de trincheiras de infiltração

Cabe destacar que ambas as trincheiras não suportam receber grandes quantidades de sedimentos, que diminuem significativamente a vida útil das estruturas de infiltração, pois promovem a colmatagem do solo e do geotêxtil. Como solução, implantam-se estruturas de remoção de sedimentos, como as bacias de decantação e as faixas gramadas. Quando o escoamento é poluído, ou seja, composto por esgoto, não deve ser lançado diretamente na trincheira, pois essa não tem potencial de tratamento pela infiltração no solo, podendo assim causar a contaminação do lençol freático. Esses volumes poluídos devem ser direcionados a tratamento específico sem passar pelas trincheiras.

A condutividade hidráulica destaca-se como o principal condicionante no processo de infiltração, essa apresenta dois limites referenciados no dimensionamento e na eficiência dos sistemas de infiltração. Trata-se dos valores mínimos e máximos de condutividade hidráulica saturada. Segundo Souza (2002), vários autores discutem estes valores sem chegarem a um consenso. A Tabela 2.3 apresenta a ordem de grandeza para condutividade hidráulica saturada em diferentes solos (Lima, 2009).

Tabela 2.3 –Ordem da grandeza da condutividade hidráulica em diferentes solos (Musy&Soutter, 1991 *apud* Lima, 2009).

k (m/s)	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-11</sup>
<b>Tipos de solos</b>	Seixos sem areia nem elementos finitos		Areia com seixos, areia grossa a fina		Areia muito fina, silte grosso a silte argiloso		Argila siltosa a argila homogênea				
<b>Possibilidade de infiltração</b>	Excelente		Boa		Média a baixa		Baixa a nula				

O valor mínimo se refere à capacidade de drenagem do solo, que não deve ser muito baixo, e o valor máximo se refere ao potencial de remoção de poluentes e ao risco de contaminação do aquífero. Se a condutividade hidráulica for muito alta, o solo não terá tempo de filtrar os poluentes. A água coletada infiltra pelas paredes e pela base. O solo requer uma taxa de infiltração não inferior a 8 mm/h (Urbonas&Stahre, 1993), para que o tempo de esvaziamento não seja elevado, e também não muito rápido (lançamento direto no lençol) a ponto de contaminar o freático, por falta de filtragem no solo.

Existe um tipo semelhante denominado trincheira de retenção. É trincheira adaptada para solos pouco permeáveis, que direciona os volumes captados para outros sistemas. Caracterizada por apresentar um sistema que armazena os volumes escoados, drena estes volumes para sistemas específicos e infiltra, no decorrer dos outros processos, apenas uma pequena parte deste (Figura 2.11).

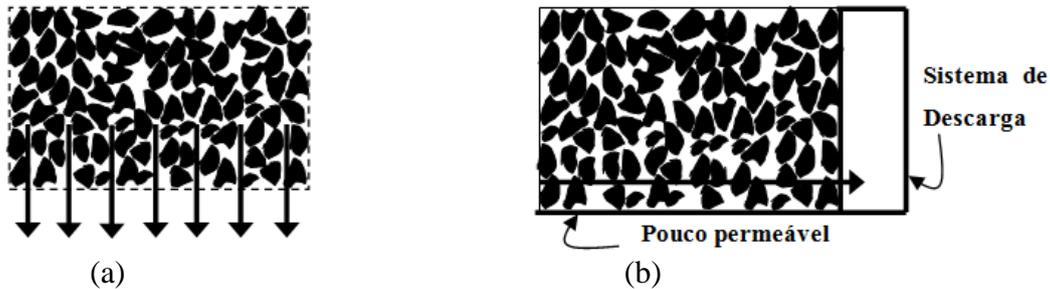


Figura 2.11 –Modelos de Trincheiras: a) de Infiltração e, b) de retenção. (Azzout *et al*, 1994).

### 2.5.1.1- CONSIDERAÇÕES SOBRE IMPLANTAÇÃO DE TRINCHEIRAS

As trincheiras de infiltração, para melhor utilização do sistema, devem ser longas e estreitas; pois, dessa forma, facilitam a sua implantação e incorporação ao urbanismo do ambiente.

Existem critérios que orientam a escolha do local e a implantação das trincheiras de infiltração, os quais, segundo Baptista *et al.*(2005) e Urbonas&Stahre (1993), são:

- Profundidade do lençol freático e da camada impermeável;
- Declividade do terreno no sentido longitudinal da trincheira, pois a sua utilização fica limitada em virtude da redução do volume útil de armazenamento;
- Tipo de solo (superficial e sub-superficial);
- Uso do solo e cobertura vegetal;
- Relação entre superfície impermeabilizada da bacia e a superfície disponível para infiltração;
- Topografia do terreno, pois a inclinação do terreno intervém na determinação do sentido preponderante do escoamento da água sobre as superfícies drenadas para as trincheiras;
- Capacidade de absorção do solo.

Urbonas&Stahre (1993) e outros autores descrevem orientações que recomendam a não implantação de trincheiras e a não disposição de água de escoamento superficial em estruturas de infiltração, caso seja observado algum dos critérios abaixo:

- Se o NA máximo sazonal do lençol estiver a menos de 1,2m abaixo do fundo da trincheira;
- Se a camada impermeável estiver a menos de 1,2m abaixo do fundo da trincheira;

- Se o solo estiver na classificação C ou D do *Soil Conservation Service* ou se a taxa de infiltração do solo saturado for inferior a 8 mm/h ou  $2,22 \times 10^{-2}$  cm/s;
- Se a superfície de infiltração for um aterro;
- Se houver proximidade com captação de água em poços;
- Se o local apresentarem uma excessiva movimentação de terra, pois pode gerar um aporte significativo de sedimentos para o interior da estrutura.

### 2.5.1.2- VANTAGENS E DESVANTAGENS

Segundo Souza (2002), as trincheiras de infiltração apresentam vantagens e desvantagens à área onde foram implantadas. Pode-se citar:

Vantagens:

- Redução do escoamento superficial;
- Ganho financeiro pela redução das dimensões das tubulações a jusante;
- Baixo custo;
- Redução dos riscos de inundação;
- Fácil construção;
- Boa integração no meio urbano, possível de ser implantada de forma a ser imperceptível no arranjo urbanístico; e
- Recarga do aquífero subterrâneo.

Desvantagens

- Possibilidade de colmatção;
- Limitações no caso de declividade longitudinal superior a 5%;
- Manutenção regular; e
- Risco de poluição do lençol subterrâneo.

### 2.5.1.3- DIMENSIONAMENTO

Existem vários métodos que determinam as dimensões e a funcionalidade de estruturas de infiltração e com elas as trincheiras. Alguns autores apresentam métodos distintos adotando diferentes metodologias, como: elementos finitos, curvas de precipitação etc. Urbonas&Stahre (1993) apresentam o “*rain-envelope-method*”, uma metodologia de dimensionamento

expedito de estruturas de percolação que utiliza dados de caracterização do local de implantação e da curva de intensidade, duração e frequência de chuva (IDF).

O método baseia-se na determinação da máxima diferença entre o volume afluente, parcela do volume precipitado que foi drenado para a trincheira, e o volume infiltrado, ou seja, volumes acumulados de entrada e saída do dispositivo. A curva de valores acumulados, no tempo, dos volumes afluentes ao dispositivo que é construída com base nas vazões obtidas a partir na curva IDF<sub>local</sub>, é comparada à curva de valores dos volumes de efluentes, determinados a partir das vazões obtidas nas características de infiltração do solo. A máxima diferença entre as duas curvas é o volume de dimensionamento, considerando a porosidade do material de preenchimento da trincheira.

Contudo, o método apresenta algumas desvantagens. Uma delas é que o volume infiltrado é estimado com base na formulação de Darcy para solo saturado, o que, de acordo com Graciosa *et al.* (2008), pode subestimar a capacidade de infiltração da trincheira, uma vez que considera que a taxa de infiltração do solo é constante e igual à taxa de infiltração na condição de saturação (situação limite). Outra desvantagem é que calcula-se o volume afluente com base no método racional e, segundo Mikkelsen *et al.* (1996), o método negligencia o efeito de chuvas sucessivas.

Segundo Lima (2009) o volume dimensionado para trincheira é calculado com base na maior diferença entre o volume afluente e o volume infiltrado, sendo o cálculo efetuado por um processo iterativo em que calcula-se o volume afluente e, em seguida:

1. Estimam-se as dimensões iniciais da trincheira, lembrando que a vazão de saída depende da superfície de infiltração, ou seja, da área lateral e de fundo da trincheira;
2. Calcula-se o volume infiltrado;
3. Constrói-se a curva acumulada com os volumes afluente e infiltrado;
4. Identifica-se o ponto de máxima diferença entre as curvas de volumes acumulados;
5. Determina-se o volume necessário de armazenamento, levando em consideração a porosidade do material de preenchimento e;
6. Compara-se o volume da trincheira com o volume de dimensionamento, se o volume da trincheira for maior ou menor que o volume dimensionado, recomeça o processo a partir do passo 2.

No que diz respeito às dimensões iniciais da trincheira, o comprimento é frequentemente imposto pela área disponível para implantação, a largura é variável, porém não pode ser muito larga, porque contribui para o processo de colmatação na base, e a profundidade deve ser compatível com os ensaios e restrita ao posicionamento do lençol freático. Para o dimensionamento das trincheiras, são requeridos coeficientes que atendam as características regionais, como: infiltração e características hidrológicas.

Na geometria, os condicionantes do dimensionamento são parâmetros hidrológicos, nesse caso, leva-se também em consideração o tipo de solo para se determinar as dimensões ou áreas infiltráveis da célula considerando-se a permeabilidade horizontal e vertical.

O material de enchimento das trincheiras tem como principal premissa a infiltrabilidade dentro do sistema, proporcionada pela disposição dos arranjos, esta não pode ser inferior a infiltrabilidade do solo. Como segunda premissa, reconhece-se a estabilidade das paredes, e, por fim, a compressibilidade do sistema para determinar-se a disposição aceitável.

#### **2.5.1.4- EXECUÇÃO E MANUTENÇÃO**

Terminada a fase de dimensionamento, parte-se para a execução propriamente dita. Entretanto, alguns cuidados devem ser tomados para evitar um mau funcionamento do dispositivo. A seguir são apresentados alguns procedimentos, sugeridos por Souza (2002), que visam minimizar esta possibilidade.

1. Na área planejada para a infiltração, deve-se evitar a utilização de equipamentos pesados, pois podem compactar o solo;
2. Após a escavação da trincheira, deve-se colocar manta geotêxtil no fundo e nos lados do dispositivo para prevenir ou minimizar o processo de colmatação no solo;
3. O material de preenchimento deve ser adicionado limpo, porque pode provocar a colmatação precoce da estrutura;
4. Um poço de observação deve ser instalado na trincheira, pois é necessário o monitoramento do seu desempenho, além de servir para medir o nível de água no interior da estrutura.

Posteriormente à execução, algumas medidas precisam ser realizadas para aumentar a vida útil da estrutura. A principal medida consiste na construção de estruturas de remoção de

sedimentos, como tanques de decantação ou faixas gramadas, que têm a finalidade de minimizar o processo de colmatação, que ocorre principalmente na base da trincheira.

Outras medidas que devem ser tomadas visando à durabilidade da estrutura são rotina de limpeza, inspeções regulares e controle dos sedimentos durante a construção.

## **2.5.2- TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO UTILIZANDO MATERIAIS ALTERNATIVOS**

Com o desafio de se adequar um sistema de infiltração às condições particulares de solo, como é o caso do Distrito Federal, o poder público depara-se com condições comumente vistas na engenharia, as limitações de cunho financeiro e técnico, sendo frequente, embora nem sempre seja o caso, a segunda dependente da primeira. Vislumbrando esse quadro, Silva (2007) associou a técnica ao custo na solução de questões ambientais atuais como o do beneficiamento das garrafas Pet, o da recarga dos aquíferos e o da redução do risco de inundações junto aos centros urbanos. O sistema de infiltração proposto, ao associar as características dos materiais utilizados na construção das trincheiras ao potencial colapsível e erodível dos solos regionais, mostra ser possível a mitigação dos riscos técnicos e dos danos ambientais com solução de menor custo que os resultantes das práticas convencionais.

Considerando-se os fatores ecológicos mais discutidos atualmente, como é o caso da preocupação com a qualidade da água, com a disposição dos resíduos plásticos no meio ambiente e com os processos erosivos gerados pela ampliação do fluxo superficial, tem-se que não só o uso de garrafas Pet como a própria implantação de trincheiras de infiltração contribuem para a mitigação dos danos ambientais ora existentes nos centros urbanos, principalmente nas áreas de expansão.

Segundo Camapum de Carvalho & Lelis (2011), o uso de garrafas Pet como material alternativo para a construção de trincheiras, além de contribuir para mitigar o problema ambiental gerado pelo excesso desses vasilhames lançados sem qualquer controle na natureza ou depositados nos aterros sanitários, possibilita maior volume de acumulação de água no interior da trincheira. A Figura 2.12 ilustra a utilização das garrafas Pet na construção de trincheiras.

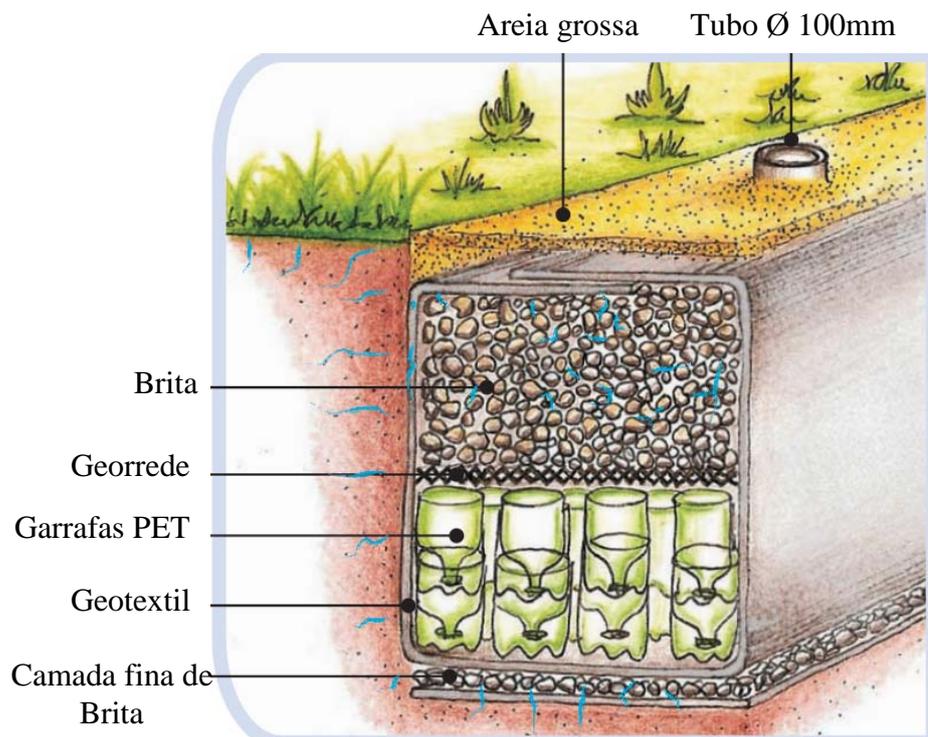


Figura 2.12 – Trincheiras de infiltração com utilização de garrafas Pet (Camapum de Carvalho &Lelis , 2011).

## 2.6- REFERÊNCIAS UTILIZADAS NA PESQUISA

Pesquisas internacionais incentivam a implantação de sistemas alternativos nos grandes centros urbanos buscando combater o acréscimo do escoamento superficial. Publicações científicas estabeleceram um marco nos estudos de infiltração do solo e nos projetos de estruturas de infiltração. Tais pesquisas destacam exemplos de estudos em países com características climáticas e hidrológicas diferentes das encontradas no Brasil. Isso confronta as condições técnicas e científicas insuficientes às condições atuais que se encontram em todo país. Por isso são necessários mais estudos e, por consequência, mais informações para o emprego de tecnologias no âmbito regional.

Kuo *et al.* (1989) desenvolveram um modelo bidimensional de elementos finitos para simular o fluxo transiente da água e determinar a taxa de infiltração, a profundidade da água e o armazenamento na trincheira de infiltração (LIMA, 2009).

Ducheme *et al.* (1994), usando um modelo de elementos finitos, concluíram que a taxa de infiltração é influenciada pela condição inicial de umidade do solo, sofre efeito limitado pela

colmatação e diminui assintoticamente com o tempo, se o nível de água na trincheira for constante.

Warnaars *et al.* (1999) monitoraram por 33 meses trincheiras de infiltração subterrâneas na região de Copenhague e observaram que, em 89 eventos de chuva, apenas 7 causaram sobrecarga da estrutura. As trincheiras foram projetadas para receber a contribuição do escoamento proveniente de um total de 600 m<sup>2</sup> de área pavimentada e telhado, e ambas apresentavam 16 m de comprimento e 0,8 m de altura e de largura.

Kronaveter *et al.* (2001), com a implantação de um micro-modelo para simular o processo hidrológico em um lote urbano localizado nas planícies costeiras de Israel, observaram que a infiltração total da chuva sobre a residência aumentou em aproximadamente 18%, com a implantação do modelo de trincheira de infiltração para coletar o escoamento.

Pesquisas científicas sobre sistemas de infiltração ainda são muito restritas no Brasil, a literatura nacional começa a ser preenchida por trabalhos inovadores. Todos os trabalhos buscam soluções rápidas para o problema, visto que, enchentes e inundações são cada vez mais frequentes no cotidiano das grandes cidades, conforme noticiários.

Paranhos (2002) elaborou sistemas de drenagem alternativos de baixo custo para obras geotécnicas e de meio ambiente na cidade de Brasília, utilizou sucatas de PET, pneus e entulho de obra como elementos passíveis de uso em drenagens geotécnicas.

Souza (2002), em estudos realizados no Rio Grande do Sul, verificou que trincheiras de infiltração podem ser utilizadas de forma eficiente no controle do escoamento superficial, desde que dispostas na fonte.

Graciosa (2005) adaptou um modelo computacional desenvolvido em Lisboa/Portugal, para avaliar a simulação computacional do processo de redistribuição em torno de trincheiras de infiltração, em células dispostas na cidade de São Carlos/SP.

Silva (2007), em estudos realizados em Brasília/DF, avaliou a viabilidade técnica e econômica do uso de garrafas Pet em substituição aos agregados granulares usados em sistemas convencionais. Essas garrafas foram cortadas/furadas/acopladas buscando uma melhor disposição do arranjo para a maior eficiência da trincheira quanto à infiltração.

Carvalho (2008) construiu e monitorou diferentes estruturas de infiltração na cidade de Goiânia/GO, buscando comparar os desempenhos e estabelecer um critério que permitisse selecionar uma estrutura que melhor atendesse as necessidades de projeto.

Lima (2009) propôs uma nova metodologia de dimensionamento de trincheiras por meio de uma análise experimental e numérica realizada em uma célula instalada na cidade de São Carlos/SP.

## **2.7- SOLOS COLAPSÍVEIS**

O fenômeno da colapsibilidade está intimamente relacionado ao aspecto estrutural dos solos. Podem apresentar diferentes origens, como: residuais ou transportados. Nos transportados, o colapso pode ocorrer em solos de formação eólica, aluvionares, coluvionares. Além desse fator origem, a textura do solo, os agentes cimentantes e de ligação, as condições de drenagem e o clima (Araki, 1997) são importantes para a formação de diferentes estruturas.

Segundo Conciani (1997), a maior parte dos solos colapsíveis encontra-se em regiões tropicais. Blight (1981) fez um estudo sobre a ação do clima na formação dos solos colapsíveis, concluindo que o clima tipo úmido a sub-úmido altera os granitos conduzindo a formação de areias siltsosas, micáceas porosas (com vazios parcialmente preenchidos com feldspato caulínizado e micas). Algumas vezes o material dos vazios é totalmente lixiviado resultando em uma estrutura muito mais porosa que a inicial.

Vargas (1993) ressalta que, após a formação do solo, os processos intempéricos continuam a atuar. Dessa forma, os solos podem sofrer uma evolução pedogenética. Nesse processo estão envolvidas ações como lixiviação, eluviação, cimentação etc; as quais geram estruturas porosas ou cimentadas.

Os solos colapsíveis apresentam uma estrutura instável, porém com uma rigidez temporária mantida pela tensão de sucção ou cimentação. O colapso ocorre quando a magnitude das tensões cisalhantes entre os grãos excede a resistência dos agentes estabilizantes para certo valor de umidade e estado de tensões.

O colapso provoca, portanto, uma descontinuidade na curva tensão x deformação, conforme ilustrado pela Figura 2.13, a qual representa uma prova de carga com inundação do solo durante o ensaio.

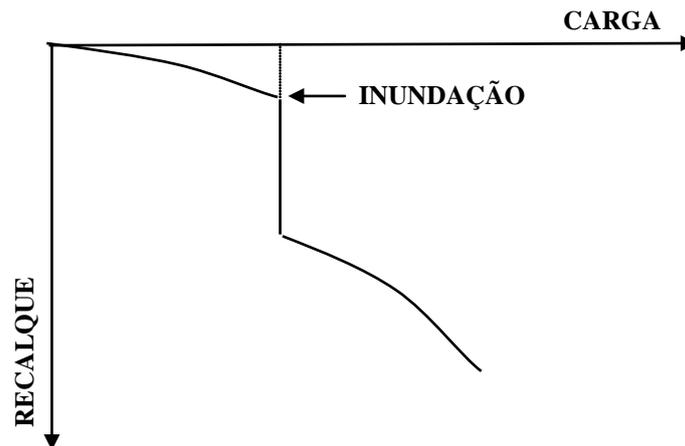


Figura 2.13- Ocorrência de colapso em prova de carga realizada com inundação do solo durante o ensaio (CINTRA,1998).

O colapso ocorre quando a magnitude das tensões cisalhantes entre os grãos excede a resistência dos agentes estabilizantes, para um certo valor de umidade e estado de tensões. A perda da ação cimentante pode dar-se também pelo aumento do grau de saturação do solo, onde os vínculos de silte/argila ou cimentos sofrem enfraquecimento ou dissolução (Hounston *et al.*, 1998). Camapum de Carvalho *et al.*, (1987), citam que, para os solos porosos do Distrito Federal, o grau de instabilidade estrutural, durante o aumento do grau de saturação, depende também da composição do fluido de inundação, onde a agressividade ou pH do fluido determina a magnitude do ataque às ligações cimentíceas.

Os requisitos básicos para o desenvolvimento da colapsibilidade em solos naturais são uma estrutura macroporosa, caracterizada por um alto índice de vazios, e a condição não saturada, representada por um baixo teor de umidade. Essas características obrigam um controle imediato quanto ao colapso dos solos de base das estruturas de infiltração.

Os acréscimos de umidade comuns nesses meios de drenagem e a carga aplicada pelo material de enchimento das estruturas proporcionam a quebra da estrutura do solo suporte, ou seja, o colapso que diminui efetivamente o potencial infiltrante do sistema de drenagem.

## 2.8- UTILIZAÇÃO DE MATERIAL RECICLADO PET

Buscando combater o acréscimo de carga aplicado pelo material de enchimento, propôs-se a troca do material pétreo, convencionalmente utilizado nessas estruturas de infiltração, pelo material reciclado Pet. O Politereftalato de etileno, ou simplesmente Pet, é uma resina plástica

e um tipo de poliéster, desenvolvido por dois químicos britânicos *Whinfield e Dickson* em 1941, formada pela reação entre o ácido tereftálico e o etileno glicol, que deu origem a um polímero. É utilizado principalmente na forma de fibras para tecelagem e de embalagens para bebidas.

A Figura 2.14 mostra o gráfico da produção e da reciclagem de garrafas Pet em toneladas por ano no Brasil.

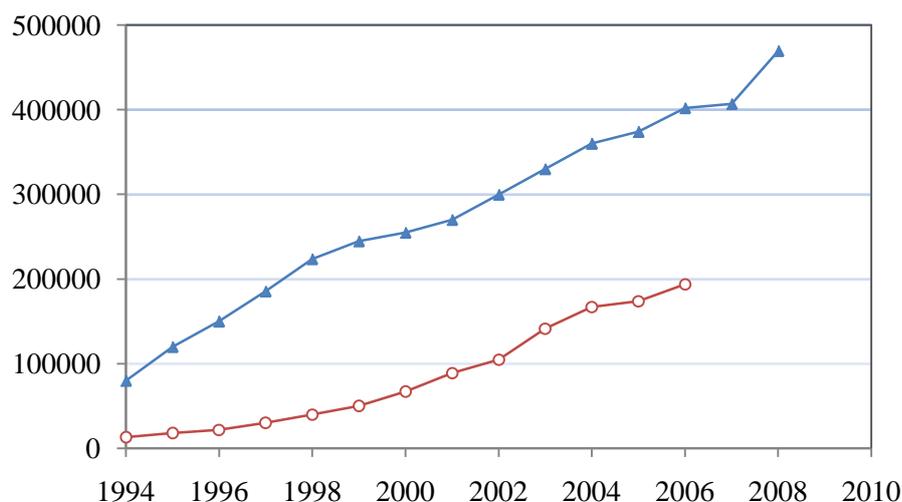


Figura 2.14 –Gráfico: produção x reciclagem de garrafas Pet (ABIPET, 2008).

## 2.9- GEOESTATÍSTICA

A estatística clássica analisa a variabilidade de um conjunto de dados por meio de parâmetros, como, desvio padrão, variância, amplitude total, porém Freitas (2000) afirma que tais indicadores de variabilidade devem ser utilizados com algumas restrições e não consideram a localização no espaço das amostras.

As técnicas geoestatísticas estudam as variáveis que admitem alguma relação espacial, o que possibilita a definição do raio de correlação espacial entre amostras. Segundo Andriotti (2003), o interesse na utilização dessa ferramenta se dá no sentido de obter o menor número possível de dados amostrais e ainda na possibilidade de predizer valores em locais não amostrados.

## 2.9.1- INTERPOLAÇÃO

A interpolação tem o objetivo de estimar parâmetros em estudo a partir do conhecimento de coordenadas de alguns dados, redefinindo aproximadamente a função interpoladora que considere a dependência entre dados que estão próximos espacialmente, e que não se afastem muito dos pontos da função construída a partir dos dados obtidos.

Segundo Miranda (2005), o processo de interpolação se dá em duas etapas: A primeira é a definição da relação entre pontos vizinhos (autocorrelação espacial), e a segunda é a definição de qual método calculará os parâmetros da população desejados e desconhecidos.

A literatura nos apresenta vários métodos de interpolação. Para cada situação, a representação da variável pode se dar por um método específico, ou seja, o conhecimento do fenômeno físico em tela, suas propriedades e comportamento irão guiar a correta interpretação dos resultados e definirão a aplicação ou não de determinado modelo.

### 2.9.1.1- MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO

São conhecidos vários métodos de interpolação. A forma mais simples de interpolar é ligar os pontos conhecidos por retas, que é denominada interpolação seccionalmente linear. Esse método gera valores constantes para o declive ou aclive de cada intervalo, ocasionando descontinuidades.

Um dos métodos mais utilizados para interpolação de dados é o Inverso Ponderado da Distância (IDW- *InverseDistanceWeighted*), que faz o cálculo do valor do ponto de interesse por meio da média dos pontos mais próximos. Essa média é ponderada pelo inverso da distância aos pontos. Landim (2000) aponta, entre outras vantagens desse método, seu fácil entendimento matemático. O método não estima valores de pontos conhecidos maiores ou menores que os valores máximos e mínimos dos dados obtidos; recomenda-se sua utilização em estimativas de espessura, concentração química e propriedades físicas. Como desvantagens, o mesmo autor cita a dificuldade de obtenção do local preciso de uma determinada isolinha caso ela não contemple os valores amostrados.

Rossi *et al.* (1994) ainda citam três características da Krigagem que a distinguem dos outros métodos de interpolação, inclusive do método IDW. A Krigagem pode fornecer uma estimativa que seja maior ou menor que os dados amostrais, sendo que as técnicas tradicionais

estão restritas a faixa de variação das amostras; os métodos tradicionais usam distâncias Euclidianas para avaliar os dados coletados das amostras. A Krigagem tem vantagem de usar a distância e a geometria, ou seja, a relação de anisotropia entre as amostras. A Krigagem considera a minimização da variância do erro esperado, por meio de um modelo empírico da continuidade espacial existente ou do grau de dependência espacial com a distância ou direção, isto é, através do variograma, covariograma ou correlograma.

Câmara *et al.* (1996) citam que a krigagem (*Kriging*) se diferencia de outros métodos de interpolação pela maneira da atribuição dos pesos para cada amostra. Nesse método, os pesos são determinados pela análise espacial com base no semivariograma experimental. Geralmente, a krigagem fornece estimativas não tendenciosas e com variância mínima.

Landim (2000) cita vantagens da krigagem, tais como: o método permite a obtenção de estimativas melhores sem tendenciosidade e com menor variância, permite estabelecer limites de confiança e indicações de aceitação de resultados e de modificação da estratégia de amostragem. Como desvantagem esse autor enumera as seguintes: muito tempo de análise computacional para grandes conjuntos de dados, possibilidade de não ser possível a construção de um variograma adequado devido à natureza da variabilidade espacial da variável em estudo.

Segundo Silva (2007), o estudo geoestatístico, baseados em interpoladores como krigagem e inverso ponderado da distância, tem-se mostrado uma valiosa ferramenta, principalmente quando a estimativa de valores, com controle e quantificação de erros, de dados provenientes de ensaios de campo, torna-se necessário. É de fácil entendimento que amostragens mais adequadas melhoram substancialmente os resultados. O sucesso dos resultados deu-se principalmente devido às características do interpolador krigagem, que não permite a produção de resultados, caso não se obtenha um variograma ajustado, isto é, caso haja uma grande aleatoriedade dos dados fornecidos, o variograma não se ajustará e o processo de krigagem não será realizado, evitando-se, dessa maneira, estimativas erradas no modelo.

### 3- MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1- INTRODUÇÃO

Buscando efetivar a realização desta pesquisa, foram realizados estudos de campo e de laboratório no solo da área onde foram construídas sete trincheiras de infiltração, implantados instrumentos de monitoramento dos ensaios de enchimento, realizadas provas de cargas e a visualização do avanço de umidade no solo utilizando a geoestatística.

#### 3.2- LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE TRABALHO

Brasília é uma cidade localizada no Distrito Federal, região Centro-Oeste do Brasil. Possui área de 5.788 Km<sup>2</sup>, está situada a uma altura de 1.000 a 1.200 metros acima do nível do mar, no chamado Planalto Central, cujos limites estão definidos ao norte e ao Sul por linhas retas em projeção plana que definem dois lados do quadrilátero correspondente à sua área, ao norte o paralelo 15°30'S, ao sul pelo paralelo 16°03'S, ao oeste pelo rio Descoberto, e a leste pelo rio Preto (Figura 3.1).

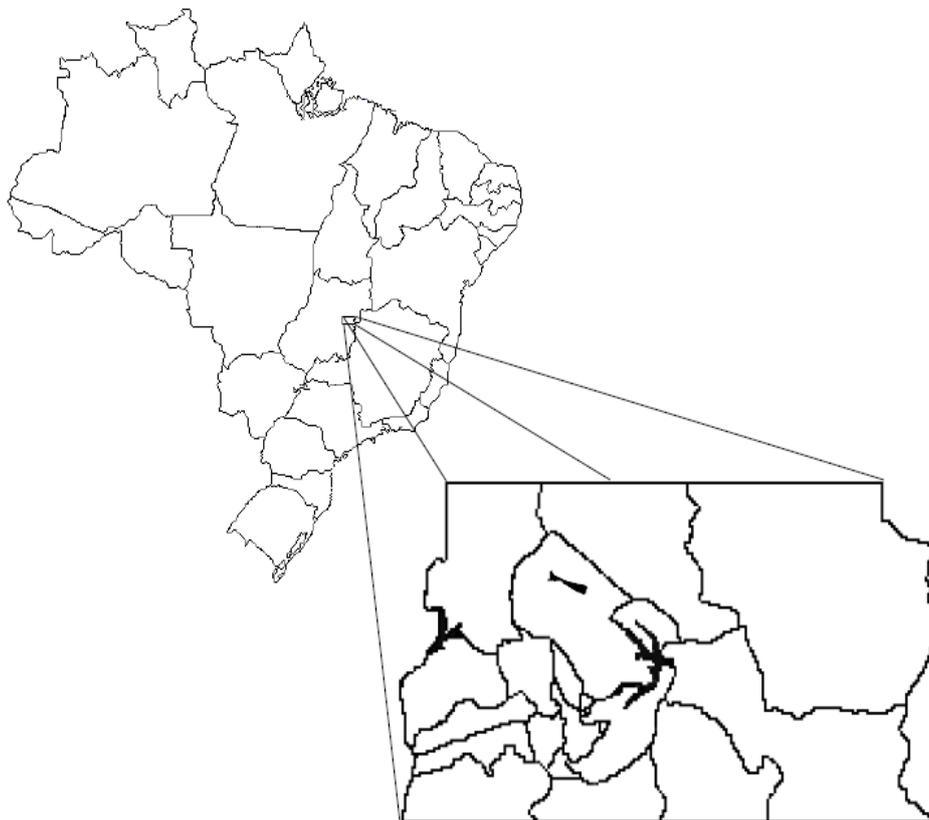


Figura 3.1 –Localização do Distrito Federal (Baptista, 1997).

A área de implantação das trincheiras localiza-se na Universidade de Brasília (UnB), no campo experimental situado próximo ao prédio SG-12 (Figura 3.2).



Figura 3.2 – Localização do Campus Darcy Ribeiro.

O clima é tropical com um verão úmido e quente e um inverno seco e relativamente frio. Como características principais, o clima do Distrito Federal apresenta duas estações bem definidas: uma seca (de maio a setembro) e outra chuvosa (de outubro a abril). A temperatura média anual é de 21°C, com máxima histórica de 35,8°C e mínima histórica de 1,6°C. A umidade relativa do ar é de aproximadamente 70%, podendo chegar aos 20% ou menos durante a estação seca (inverno). Segundo Silva (1992), as mudanças de estações geram as condições favoráveis para que ocorra alteração do solo, por meio de processos de oxidação, lixiviação e carregamento de partículas. A esta influência se juntam as importantes variações térmicas diárias e os períodos curtos de dias com insolação, seguidos de pancadas ou períodos

mais extensos de chuva. As variações térmicas e de sucção impõem ao solo importantes gradientes de energia intervindo diretamente na dilatação térmica diferencial dos minerais que compõem os agregados, instabilizando-os, e na imposição de gradientes hidráulicos capazes de provocar o transporte de compostos químicos e coloides. O solo formado apresenta estrutura com características peculiares e comportamento geotécnico bastante distinto, sendo o processo de formação denominado laterização e, o produto final, solo laterítico.

A escolha da área deveu-se às características do perfil de solo serem representativas dos solos regionais, além da proximidade ao laboratório de geotecnia da UnB, visto que a coleta de solos, a montagem e o monitoramento das células necessitam de equipamentos apropriados e, com a proximidade física, facilitou-se o transporte do material e do solo coletado para estudo durante o monitoramento.

### **3.3- ENSAIOS DE CAMPO**

#### **3.3.1- PENETRÔMETRO DINÂMICO LEVE (PANDA)**

O penetrômetro dinâmico portátil PANDA (Pénétromètre Automatique Numérique Dynamique Assisté) fornece a medida da energia cinética durante o processo de cravação de um cone, o que permite obter diretamente a resistência de ponta do solo (qd), expressa em MPa. É empregado em investigações do solo e no controle do processo de compactação de obras geotécnicas. O ensaio é descrito pela SN 670/02, sendo realizado por meio da cravação de uma haste de aço com três diferentes tipos de pontas cônicas (2cm<sup>2</sup>, 4cm<sup>2</sup> e 10cm<sup>2</sup>) por golpes de um martelo de peso fixo (Figura 3.3a).

O equipamento apresenta como principais vantagens a rápida montagem do aparato, razoável poder de penetração, a facilidade de manuseio e um sistema automático de aquisição de dados.

Com o objetivo de correlacionar a resistência do solo natural com a resistência do solo úmido após infiltração de água, foram realizados ensaios com o equipamento PANDA no local de implantação das trincheiras até a profundidade de 5,00m. Estes ensaios foram realizados antes e depois do ensaio de infiltração (Figura 3.3b).

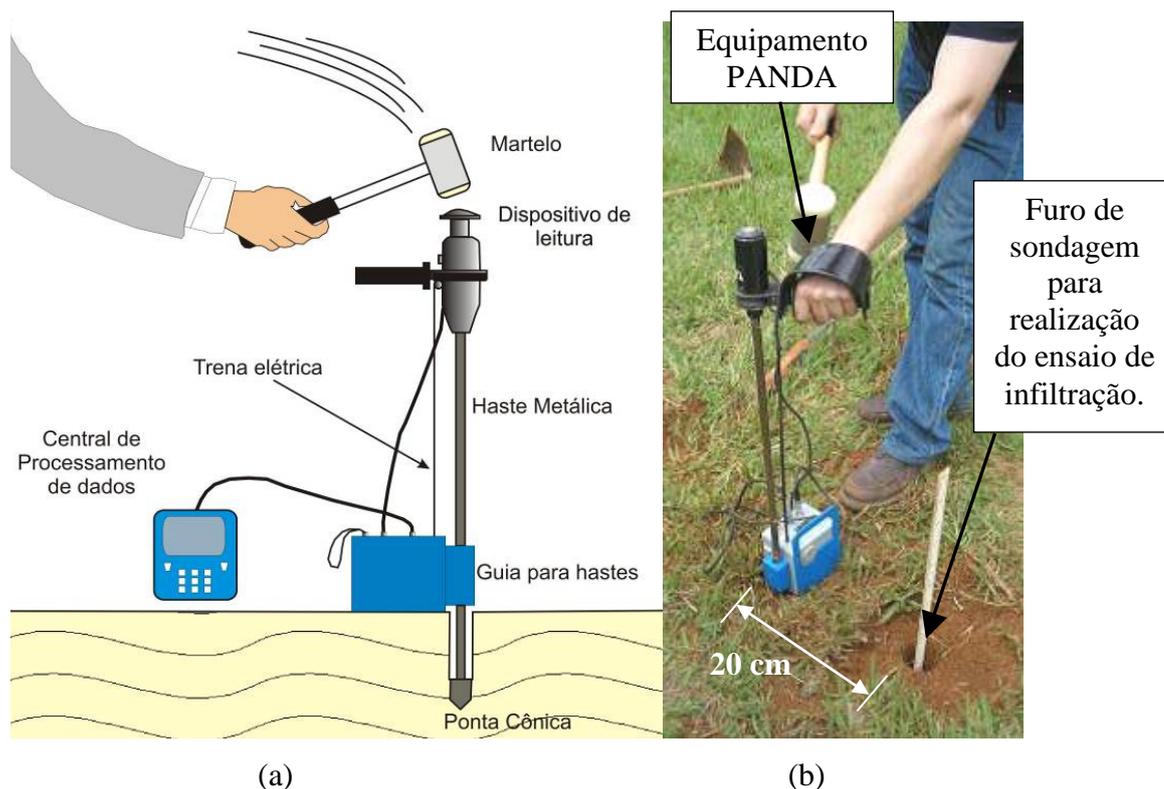


Figura 3.3– a) Sistema de funcionamento do ensaio PANDA. (Modificado- Langdon,1999 *apud* Araújo, 2009); b) Realização do ensaio PANDA próximo ao ensaio de infiltração

### 3.3.2- ENSAIOS PARA RECONHECIMENTO DA ÁREA

Para a seleção do local de implantação das células, foram realizados ensaios de campo do tipo: penetrômetro dinâmico leve com energia variável, o qual permite determinar a resistência de ponta utilizando-se o equipamento PANDA, seguindo o procedimento descrito na SN 670/02; ensaio de permeabilidade por rebaixamento em profundidade em furo de sondagem, que permite obter os valores médios de permeabilidade em campo seguindo o procedimento de ensaio N° 04 da ABGE 1996 e; em superfície, seguiu-se o método do infiltrômetro de cilindros concêntricos, que permite determinar a taxa de infiltração na superfície do solo (Tabela 3.1). Esta definição da área de estudo foi objeto da dissertação de mestrado de Silva (2007).

Tabela 3.1 – Ensaios de campo – Fase de seleção da área.

Ordem	Ensaio	Resultado
1°	Permeabilidade em furo de Sondagem	Permeabilidade
2°	PANDA – Penetrômetro dinâmico leve	Resistência de Ponta
3°	Cilindros concêntricos	Taxa de Infiltração

Conforme a Figura 3.4, a área em estudo situa-se a direita da via L3 no sentido sul norte, próxima ao campo experimental da Pós Graduação em Geotecnia da UnB, em frente aos prédios dos Ex-alunos da UnB e da Casa do professor.



Figura 3.4 –Área de implantação das trincheiras (Silva, 2007).

### 3.3.3- PERMEABILIDADE E MEDIÇÃO DA UMIDADE

Para o monitoramento da área no que se refere à dinâmica da água no solo, foram realizadas oito etapas de ensaios de permeabilidade em furo de sondagem à trado pelo método do rebaixamento, o qual permite obter os valores médios de permeabilidade seguindo o procedimento de ensaio N° 04 da ABGE 1996.

Com a utilização de um trado manual de  $\varnothing = 0,10\text{m}$ , escavou-se o furo principal com uma profundidade de 2m, onde foram realizados todos os ensaios de infiltração. Os ensaios foram realizados com o preenchimento do furo principal com água da rede de abastecimento até o topo do furo, utilizando-se de uma mangueira com um hidrômetro para o controle das vazões. Com a utilização de uma régua graduada, fixou-se o nível superior em 0,0cm correspondendo ao tempo de ensaio  $t=0$  (Figura 3.5).



Figura 3.5 - Ensaio de rebaixamento em furo de sondagem a trado.

Em seguida, fizeram-se as leituras dos tempos em que ocorriam rebaixamentos de 0,05m de intervalo até atingir o rebaixamento total de 0,30m. Quando o nível da água atingia essa profundidade, preenchia-se novamente o furo para que o nível d'água atingisse o topo, repetindo-se esse procedimento até obterem-se tempos de infiltração aproximadamente constantes, ou seja, quando já não eram observadas variações progressivas nos valores obtidos dos tempos para  $\Delta h = 0,05m$ .

A NBR 6457/96 prescreve o método de determinação do teor de umidade em laboratório e cita equipamentos necessários: balança com resoluções e sensibilidades compatíveis com a quantidade e tipo de solo e estufas com capacidade de manter temperaturas estáveis entre 105°C a 110°C.

Para o monitoramento da frente de umedecimento, foram realizadas coletas de amostras a diferentes profundidades e distâncias do furo de ensaio, antes e após os ensaios de infiltração, e determinadas as umidades em laboratório pelo método gravimétrico da estufa. As coletas de amostras foram realizadas em 64 furos, denominados furos de inspeção de umidade, utilizando um trado manual de  $\varnothing = 0,05m$ , em linha reta, distribuídos radialmente a partir do furo central de infiltração, haja vista que os furos de inspeção realizados após o ensaio de

infiltração foram realizados em sentido oposto aos realizados antes do ensaio de infiltração (Figura 3.6).

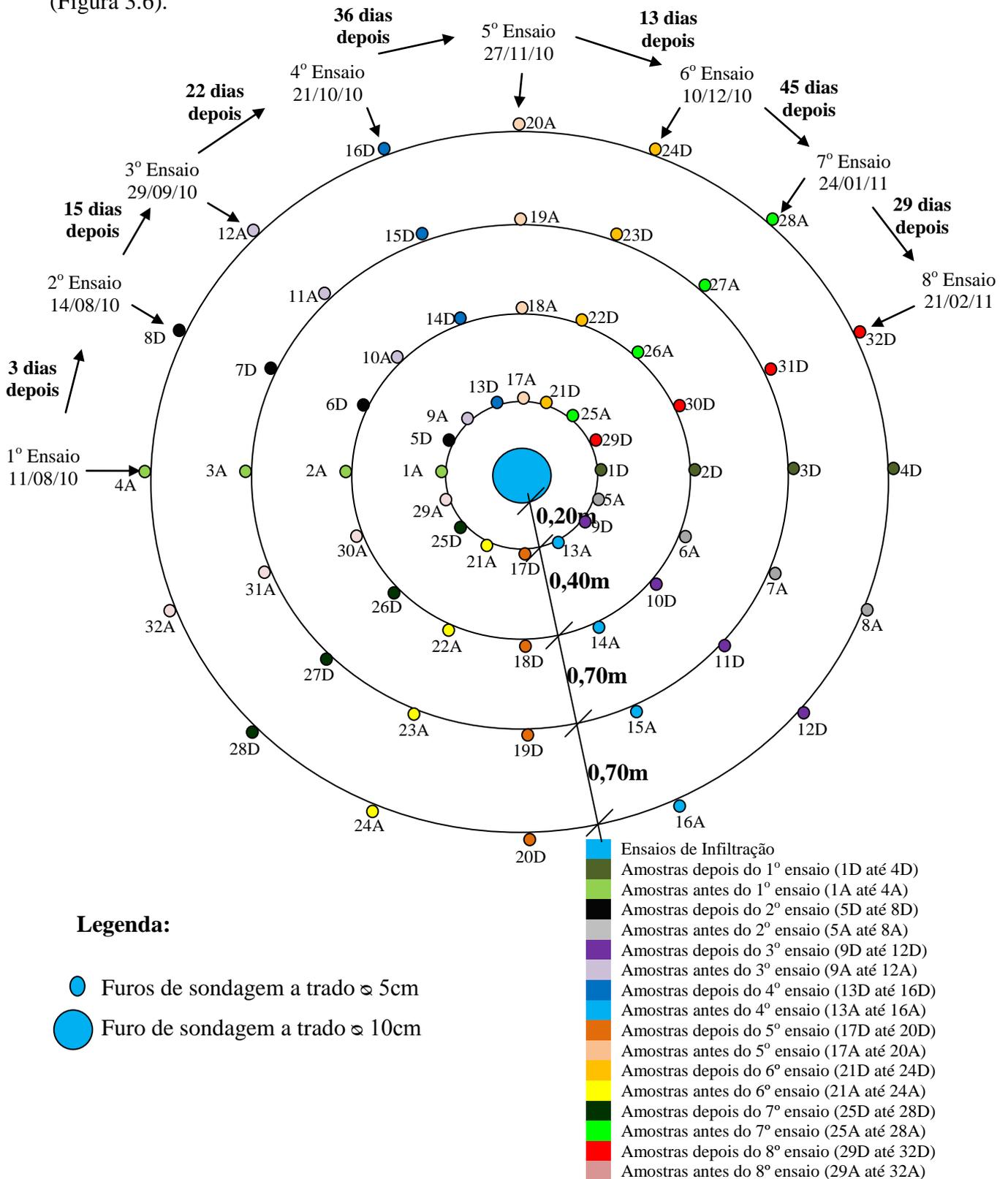


Figura 3.6 - Distribuição dos furos para retirada de amostras, controle de umidade e ensaios de infiltração.

Na Figura 3.6, estão apresentados os pontos de retirada de amostras intercalando retiradas antes dos ensaios com as retiradas depois dos ensaios. Destaca-se também o intervalo em dias entre os ensaios de infiltração.

Foram realizados oito ensaios de rebaixamento à carga variável, iniciados em agosto de 2010 e finalizados em fevereiro de 2011 (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Etapas de ensaios de permeabilidade e umidade em campo.

Etapas	Data do Ensaio	Furos de Inspeção de Umidade
1°	11/08/2010	1A até 4A 1D até 4D
2°	14/08/2010	5A até 8A 5D até 8D
3°	29/09/2010	9A até 12A 9D até 12D
4°	21/10/2010	13A até 16A 13D até 16D
5°	27/11/2010	17A até 20A 17D até 20D
6°	10/12/2010	21A até 24A 21D até 24D
7°	24/01/2011	25A até 28A 25D até 28D
8°	21/02/2011	29A até 32A 29D até 32D

Para cada ensaio de infiltração, foram feitas coletas em perfis localizados à 0,20 m, 0,60m, 1,30m e 2,0m do furo principal. A coleta de amostras iniciava-se a partir do perfil mais próximo do ponto ensaiado. Nos furos de inspeção para determinação dos perfis de umidade, foram retiradas amostras a cada 0,50m de profundidade a partir da superfície até atingir a profundidade de 3,00m (Figura 3.7). Os furos de amostragem eram em seguida fechados para evitar secagem do maciço e interferência em novos ensaios.

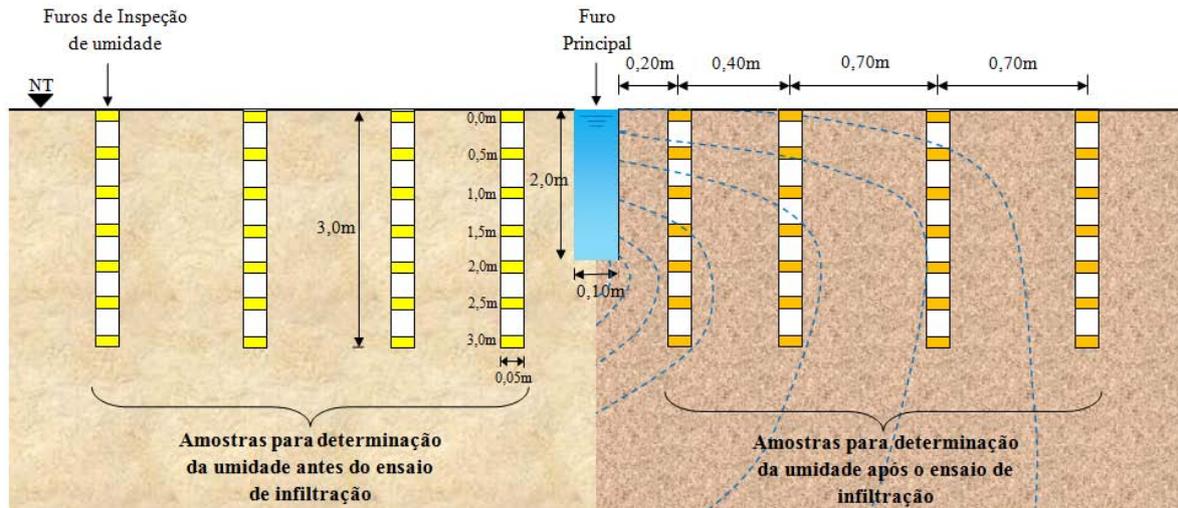


Figura 3.7 - Perfil de coletas de amostras.

### 3.4- ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Anteriormente à realização de cada ensaio, as amostras foram preparadas conforme prescrições da NBR 6457/1986. A seguir, são apresentadas as principais determinações para a caracterização geotécnica das amostras:

- Umidade Natural e Umidade Higroscópica: as determinações dos teores de umidade foram realizadas de acordo com a norma da ABNT NBR 6457/1986. Para a determinação da umidade natural, utilizou-se solo nas condições de amostragem e, para a umidade, utilizou-se solo seco ao ar após 24 horas;
- Peso Específico dos Grãos ou dos Sólidos; conforme prescrição da norma ABNT, NBR 6508/1984;
- Peso Específico Natural; foi determinado seguindo a NBR 2887/1988;
- Análise Granulométrica; a análise foi realizada segundo prescrições da NBR 7181/1984. Utilizou-se também a análise por meio do granulômetro a laser. Foram feitos ensaios com e sem o uso de defloculante e de ultrassom;
- Índices de Consistência; o ensaio de limite de liquidez foi realizado segundo a NBR 6459/1984 e o limite de plasticidade obtido de acordo com a NBR 7180/1984;
- Classificação Geotécnica MCT Expedita; realizada de acordo com prescrição da Norma Técnica DNER-ME 063 “Descrição e Identificação Expedita (Visual e Táctil) de Solos”;
- Sucção pelo Método do Papel Filtro, seguindo a metodologia adotada por Marinho (1995), descrita pela norma americana ASTM D5298/1992;

- h) Permeabilidade à Carga Constante e Variável; prescritos pela ABNT nas NBR 14.545/00 e NBR 13.292/95, pelos métodos da “carga variável” e da “carga constante” respectivamente;
- i) Ensaio de Furo e Agulha – *Pinhole Test*; o procedimento de ensaio usado encontra-se descrito na NBR 14.114 Jun/1998 “Solo – Solos argilosos dispersivos – Identificação e classificação por meio do ensaio do furo de agulha (*pinholetest*)”. Controlou-se, no ensaio, seguindo as recomendações de Santos (2001), a vazão nas fases de carga e descarga;
- j) Adensamento Oedométrico; realizaram-se ensaios oedométricos segundo as prescrições da NBR 12.007/90;
- k) Cisalhamento direto; seguindo a ASTM D3080;
- l) Difratomia de Raios-X (DRX).
- m) Permeabilidade em adensamento oedométrico na célula Rowe.

Com a finalidade de se determinar coeficientes de permeabilidades em diferentes estágios do adensamento do solo, utilizou-se a célula Rowe. Esta célula foi desenvolvida na Universidade de Manchester pelo professor Peter Walter Rowe, em 1972. Destaca-se que, nessa célula, a amostra ensaiada é carregada hidraulicamente pela pressão de água, diferentemente dos oedômetros convencionais, os quais utilizam um sistema mecânico de alavanca com a colocação de pesos.

A célula utilizada foi a de 75,0mm de diâmetro. A Figura 3.8(Silva, 2006) apresenta a célula Rowe e seus dispositivos principais: o diafragma flexível de borracha utilizado para aplicar pressão de água no carregamento hidráulico; o defletômetro para medição dos recalques; as pedras porosas no topo e na base para melhor distribuição da água inundante, evitando o piping e; os pontos de saída d’água, utilizados para realizar as medidas de permeabilidade.

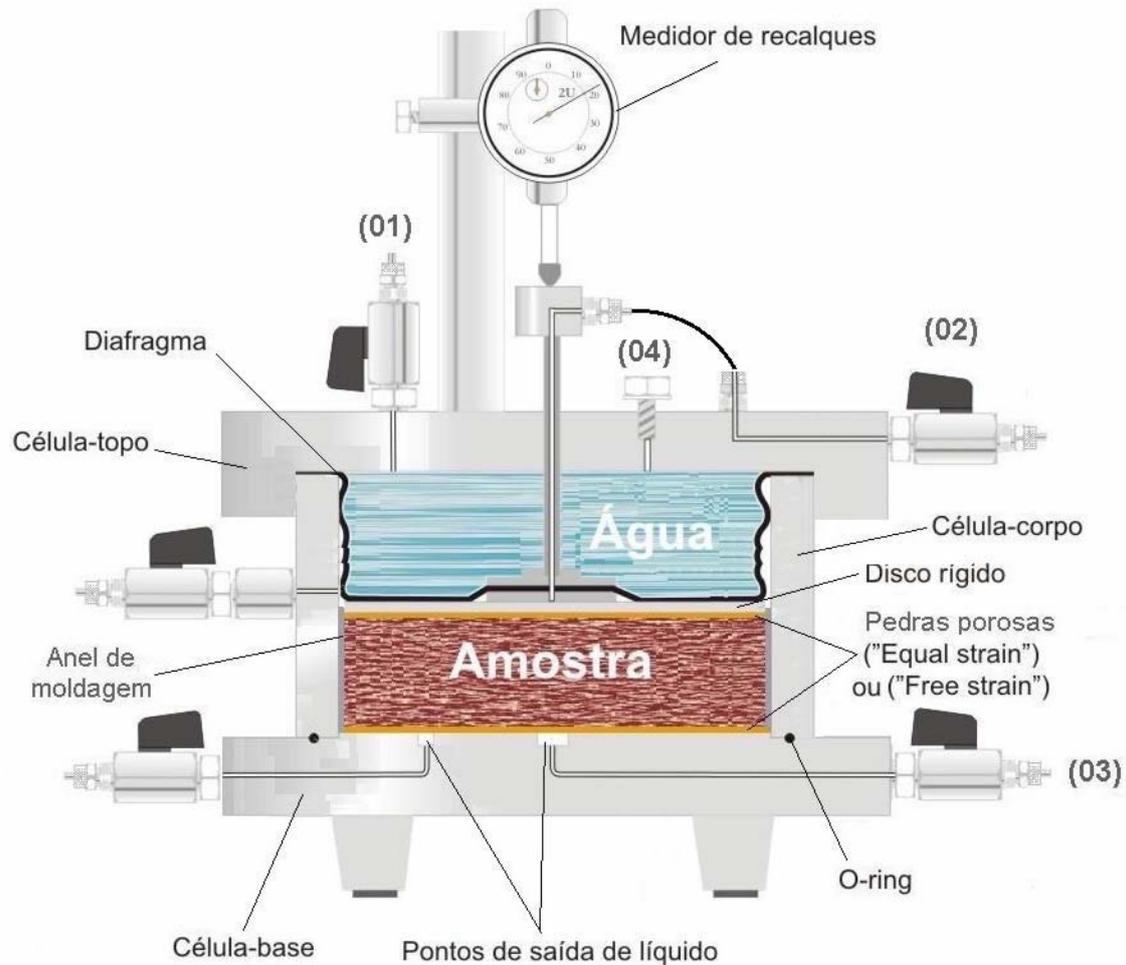


Figura 3.8 - Corte transversal esquemático da célula Rowe (Silva, 2006).

Segundo Silva (2006), os ensaios oedométricos feitos com a célula Rowe apresentam algumas características e vantagens sobre os ensaios feitos nos oedômetros convencionais:

- Podem ser realizados 08 (oito) diferentes tipos de ensaios oedométricos, apresentando o controle de diferentes condições de drenagem, tanto vertical quanto horizontal e, ainda, permitindo que a poropressão atinja um valor de equilíbrio após a aplicação do carregamento antes que a drenagem seja iniciada;
- As amostras podem ser saturadas pela aplicação de contrapressão, a qual pode ser mantida durante o ensaio;
- Uma dada história de tensões e as condições de contorno da drenagem da água *in situ* podem ser impostas na amostra para simular as condições de campo;
- A poropressão, além do recalque e do volume de água que sai da amostra, é medida do começo ao fim do procedimento de ensaio, em cada estágio de carregamento. O fim da fase de adensamento primário se torna, então, conhecido;

- Podem ser realizadas medidas de permeabilidade, vertical e horizontal (radial);
- A amostra é menos susceptível a impactos oriundos do carregamento;
- Altas tensões também podem ser aplicadas.

O corpo de prova é posicionado entre duas pedras porosas e papéis filtro para evitar o carregamento de finos. Para a realização dos ensaios de permeabilidade, foi necessária a troca das pedras porosas pertencentes à célula, pois elas apresentavam uma permeabilidade baixa, fato que poderia afetar diretamente a leitura da permeabilidade das amostras. Buscou-se, então, a produção de uma pedra porosa de alta permeabilidade, utilizando areia grossa padronizada e sikadur 32\* como cola (Figura 3.9a), seguindo-se o seguinte procedimento: adicionou-se 40g de areia para uma traço de 1,5g de sika branco e 0,75g de sika cinza; misturaram-se estes insumos em um recipiente de louça por um tempo máximo de 10min; após os 10min, depositou-se a mistura em um molde cilíndrico de acrílico de  $\varnothing = 70\text{mm}$  untado com vaselina para não colar nas paredes do molde (Figura 3.9b); levou-se o conjunto até a prensa de adensamento convencional, sendo aplicada uma carga de 50kg por um tempo de 24 horas para o descarregamento e desmolde (Figura 3.10a); após o desmolde, a pedra apresenta-se com um diâmetro de 70mm e altura aproximada de 7mm. Ao final, fez-se um teste simples, o qual consistiu em, assoprando-se com ar comprimido numa face da pedra porosa, o sopro deveria ser sentido no lado oposto da pedra com facilidade. Esta mistura fornece uma pedra porosa de resistência aproximada de 70 Mpa, porosidade em torno de 60% e permeabilidade muito elevada. Foram produzidas várias pedras porosas para utilização na base e no topo dos corpos prova (Figura 3.10b).

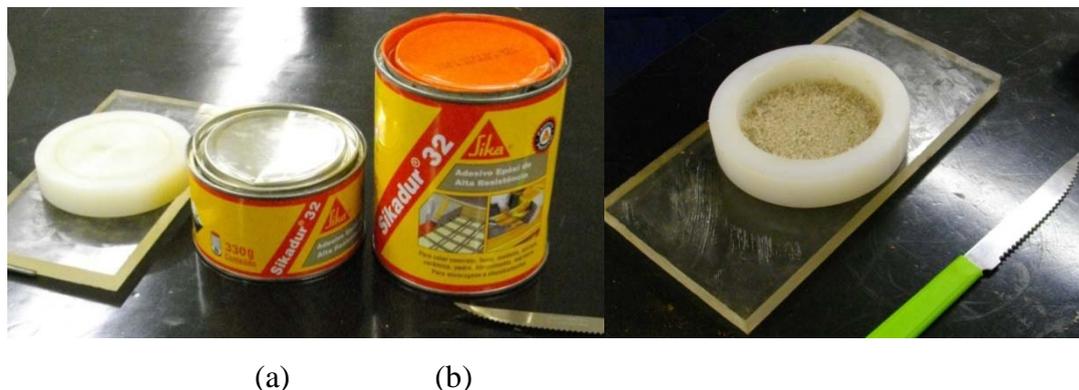
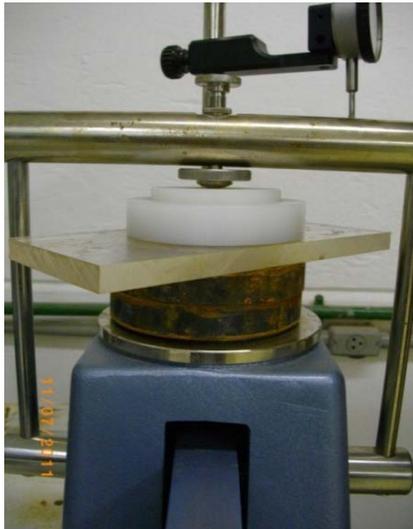
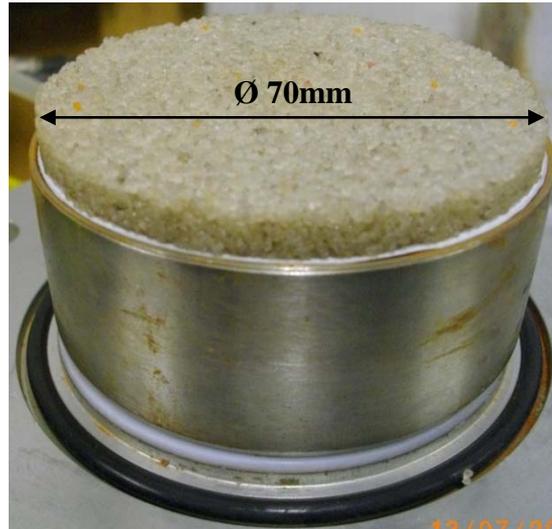


Figura 3.9 - a) Sikadur 32 utilizado para colagem da areia e b) molde da pedra porosa.



(a)



(b)

Figura 3.10– a) Prensa utilizada e b) pedra porosa em seu estado final.

Para realização dos ensaios na célula Rowe, são necessários dispositivos para a aplicação de pressão de ar e controle dos volumes de água que entram e saem da amostra. Tais dispositivos são apresentados na Figura 3.11 e descritos a seguir:

- Sistema de suprimento de ar comprimido; para o carregamento vertical da amostra, são necessários dispositivos de aplicação de pressão na água. Como principais aspectos, pode-se destacar o sistema de pressão de ar comprimido, o painel com manômetro para leituras e válvulas para controle das pressões;
- Dispositivos de interface ar-água, conectados ao painel de controle por meio de mangueiras, que são utilizados para aplicação do carregamento hidráulico. Um carrega a membrana de borracha (diafragma) no topo do corpo de prova e o outro inunda o corpo de prova com água sobre pressão, podendo simular variação de gradientes na amostra;
- Sistema de medição de volume com uma bureta e válvulas de controle, inicialmente utilizados no adensamento para a expulsão da água dos poros. Posteriormente, a cada estágio de carregamento, fez-se a aplicação de água com diferentes pressões (gradientes), inundando-se a amostra. Estabelecido um fluxo, abriam-se as válvulas e, utilizando a bureta, acompanhava-se a variação de volume com o tempo, determinando assim a permeabilidade em cada estágio de carregamento com diferentes gradientes.

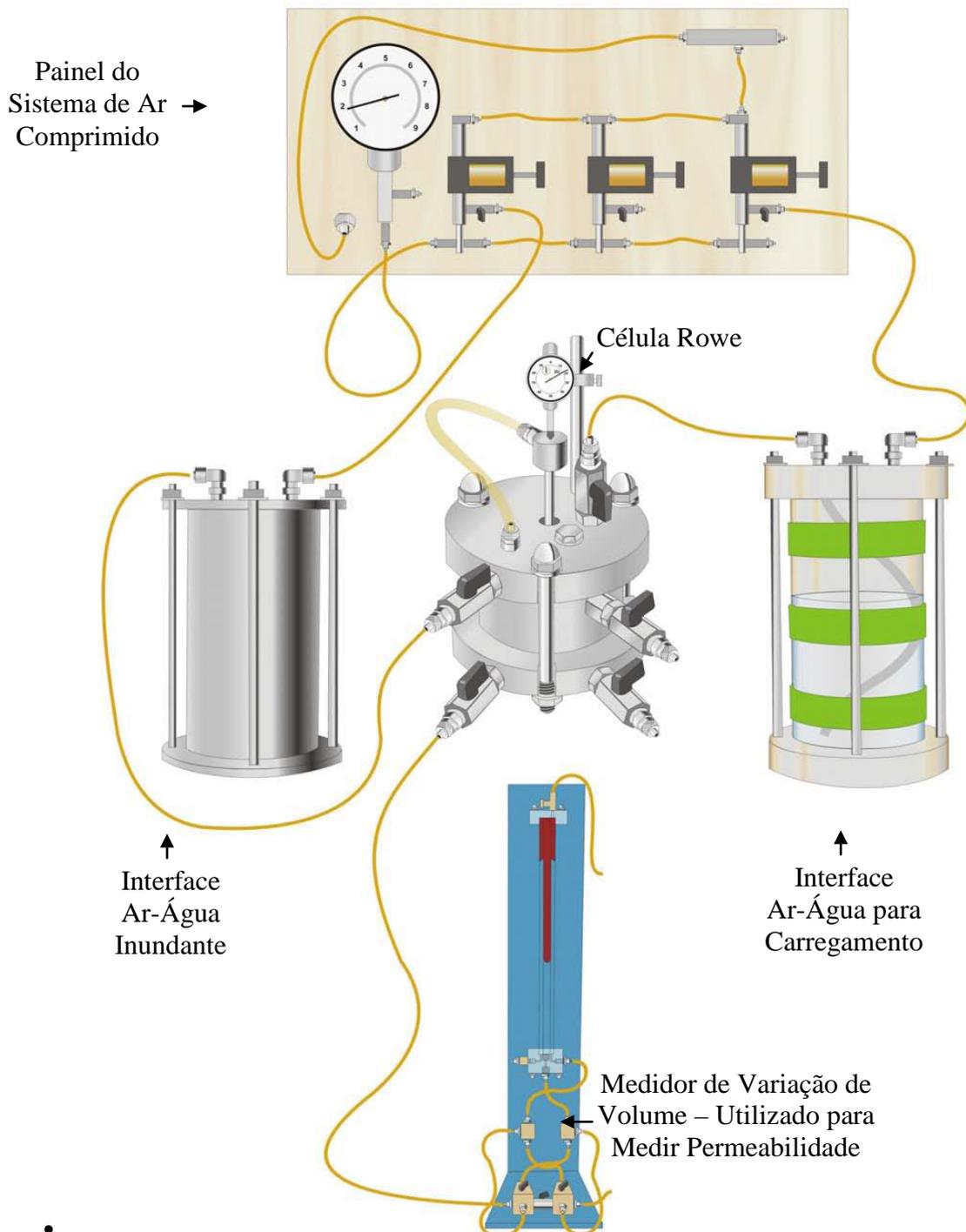


Figura 3.11 - Arranjo geral com detalhes das conexões e tubulações. (Silva, 2006).

O ensaio foi realizado em três fases: saturação, adensamento e permeabilidade. Para a fase de saturação, após a montagem, iniciou-se a inserção ascendente da água no corpo de prova por 24 horas. Após a saturação da amostra, iniciou-se a aplicação das cargas na interface ar-água para carregamento. Para cada carga aplicada, acompanhava-se o adensamento por 24 horas. Após cada etapa do adensamento, realizava-se a aplicação de carga na interface ar-água

inundante, do corpo de prova, simulando-se assim a variação crescente de gradientes determinados a partir das perdas na célula e da altura do corpo. A cada estágio da tensão inundante realizava-se a medida da quantidade de água percolada por intervalo de tempo, determinando-se assim a permeabilidade naquele estágio. O ensaio foi realizado em seis etapas, iniciando com uma tensão normal de 5 kPa e finalizando com a tensão de 400 kPa (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 –Tensões e gradientes utilizados em cada etapa.

		Tensão Inundante (kPa)						
		2,5	5	10	20	30	40	
Etapa	Tensão Normal (kPa)	Gradiente (mca)						
1 <sup>a</sup>		5	Os gradientes serão diferentes, calculados a cada estágio de tensão inundante, levando em consideração as perdas na célula e a altura de cada corpo de prova após cada etapa de adensamento.					
2 <sup>a</sup>		10						
3 <sup>a</sup>		50						
4 <sup>a</sup>		100						
5 <sup>a</sup>		200						
6 <sup>a</sup>		400						

Considerando as condições de campo, no qual foram realizados os ensaios de enchimento nas trincheiras, buscou-se atender a duas situações: a primeira, considerando a permeabilidade horizontal realizada nas paredes das trincheiras e o adensamento ocorrido devido a carregamentos naturais em solo e; a segunda, considerando a permeabilidade vertical ocorrida no fundo da trincheira e o adensamento ocorrido devido ao peso próprio de cada material constituinte. A Figura 3.12 apresenta a posição da retirada dos blocos utilizados na confecção dos corpos de prova usados nos ensaios de adensamento e permeabilidade: (1) bloco retirado na profundidade de 1,0m à 1,5m, no qual realizou-se os ensaios no sentido horizontal; e (2) bloco retirado na profundidade de 1,5m à 1,80m, no qual realizou-se os ensaios no sentido vertical. As variações de gradiente adotadas objetivaram, pela técnica de translação de eixos, simular os gradientes impostos pela sucção, que diminuem com a infiltração devido ao avanço da frente de saturação.

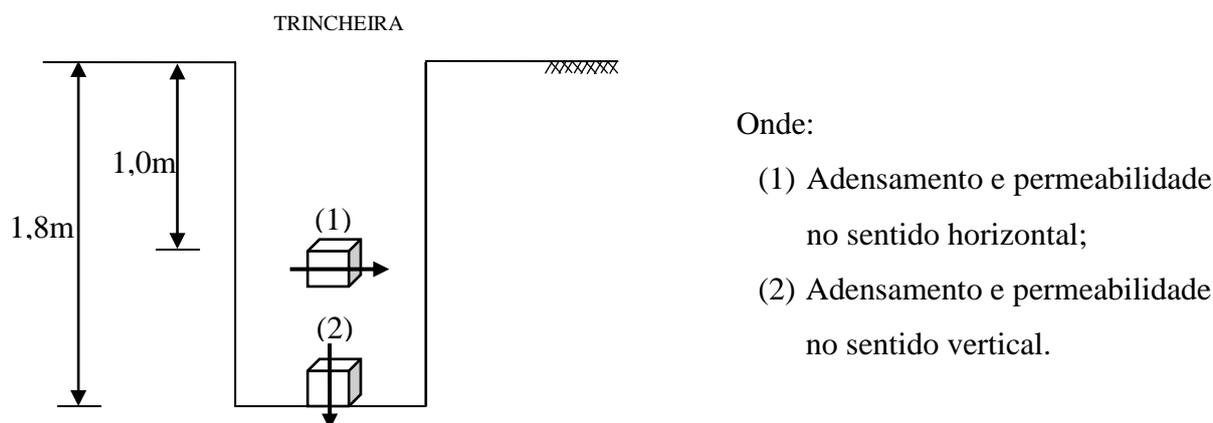


Figura 3.12 – Visualização em corte da localização dos blocos utilizados para realização dos ensaios de adensamento e permeabilidade na célula Rowe.

### 3.5- CONSTRUÇÃO DAS CÉLULAS EXPERIMENTAIS DE CAMPO

Para a construção das células experimentais de campo (trincheiras de infiltração), primeiramente determinaram-se as dimensões e, em seguida, definiu-se e caracterizou-se o material de enchimento; estabeleceram-se os arranjos de disposição dos materiais de enchimento; definiram-se os instrumentos e a forma de monitoramento; em campo, efetuaram-se a escavação e a retirada de amostras deformadas e indeformadas e posteriormente a construção e montagem da instrumentação; para finalizar, foi realizada a montagem do sistema *in situ*.

#### 3.5.1- DIMENSIONAMENTO DAS TRINCHEIRAS

Zimmeret *al.* (1998) apresentam um método de dimensionamento de trincheiras de infiltração utilizando elementos finitos. Métodos mais simples são relacionados por Leeflanget *al.* (1998), que incluem curvas de dimensionamento, ou por Jonasson (1984) e Urbonas&Stahre (1993), que utilizam o “rain-envelope-method”. O último é um método clássico que promove um balanço hídrico simplificado para dimensionamento de estruturas com armazenamento. Tradicionalmente é usado no dimensionamento expedito de bacias de retenção (DAEE/CETESB, 1980) sendo recomendado para o dimensionamento das estruturas de percolação quando os critérios para utilização de dispositivos de infiltração (apresentados anteriormente) são atendidos.

Para o desenvolvimento desta pesquisa experimental, foi utilizado o método “*rain-envelope-method*” por ser mais simples e com aplicação direta a partir dos dados de caracterização do local de implantação e da curva IDF (intensidade-duração-frequência).

Normalmente, as trincheiras são dimensionadas em função de fatores como área de captação, balanço hídrico, escoamento superficial, características de infiltrabilidade do solo ao longo do perfil, área disponível para a implantação, período de retorno, etc. No entanto, Silva (2007) pré-fixou as dimensões das trincheiras prevendo a alimentação controlada delas.

Seguindo o procedimento de cálculo citado por Silveira (2003), em que se igualando as alturas do volume afluyente e efluente, busca determinar-se a altura de dimensionamento da trincheira, torna-se necessário adotar e fixar alguns valores, tais como:

- A largura da trincheira entre 0,80m e 1,00m, é a menor dimensão utilizada por um “poço” para a retirada de blocos indeformados;
- Tempo de retorno de 2 anos;
- Coeficiente de permeabilidade da área  $k = 3 \times 10^{-2}$  cm/s, determinado a partir dos ensaios de campo na área selecionada;
- Porosidade da Brita 02  $\approx 47\%$ ;
- Coeficiente de escoamento  $C = 0,95$ . Para o dimensionamento, pode-se considerar que as áreas impermeáveis e permeáveis contribuirão para a estrutura, tendo coeficiente de escoamento (C), admitindo possível captação de pavimento.

Esta pesquisa seguiu as dimensões definidas por Silva (2007), que realizou o procedimento de dimensionamento de forma interativa, por se tratar de um modelo experimental, calculando a partir das dimensões supra pré-estabelecidas das trincheiras, adotou-se coeficientes e valores com a finalidade de se limitar uma área de captação e determinar o comprimento, a altura e a área de contribuição. Determinaram-se então as seguintes dimensões:

- Área de  $2500\text{m}^2$  de contribuição;
- Largura  $B = 0,80$  m;
- Comprimento  $L = 2,00$  m;
- Altura  $H = 1,76 \approx 1,80$  m, fixou-se a profundidade da trincheira em 1,80m, para facilitar no controle da escavação.

### 3.5.2- MATERIAIS UTILIZADOS NO ENCHIMENTO DAS TRINCHEIRAS

Convencionalmente, as trincheiras são preenchidas com agregados pétreos graúdos, de modo a possibilitar a drenagem e garantir certo armazenamento de água. Seu peso excessivo, no entanto, geralmente, termina por compactar ou consolidar o fundo da trincheira, reduzindo a área e a capacidade de infiltração. Buscando uma solução para o problema e visando maximizar o volume do reservatório na trincheira, foi estudada a inserção de garrafas Pet neste sistema, em substituição à brita convencionalmente usada. Destaca-se que tal utilização contribui ainda para a solução de outro problema ambiental: o da destinação deste resíduo.

Os materiais utilizados na construção das células foram areia grossa, brita 02, garrafas Pet de 2 litros, geotêxtil não tecido Bidim OP 20 (desempenhando a função de filtro) e tijolos cerâmicos. As garrafas Pet foram utilizadas de quatro formas distintas: a primeira maneira foi a de garrafas inteiras, verdes, do mesmo tipo e forma conforme ilustrado na Figura 3.13a. Outro arranjo estudado foi o de garrafas verdes cortadas/furadas/acopladas conforme ilustra a Figura 3.13b.



Figura 3.13 – Arranjo de garrafas: (a) inteiras verdes e (b) cortadas-acopladas.

A terceira maneira estudada foram garrafas inteiras, porém de cores variadas conforme pode ser observado na Figura 3.14a. A quarta e última forma de utilização das garrafas como material de enchimento pode ser visualizada na Figura 3.14b, na qual as garrafas de cor verde foram totalmente amassadas utilizando um fogareiro a gás para aquecer enquanto comprimidas manualmente sobre a chama.



Figura 3.14– Arranjo de garrafas: (a) inteiras variadas e (b) amassadas.

Para melhor caracterizar o material de enchimento, visto que ele foi utilizado como elemento estrutural das células, foram realizados ensaios de compressão sobre cada tipo de garrafa e sobre conjuntos delas.

### 3.5.2.1- ENSAIOS DE COMPRESSÃO INDIVIDUAL

Para caracterização das garrafas Pet e identificação do melhor modo de utilizá-las, foram realizados ensaios de compressão simples nas garrafas inteiras, cortadas, cortadas/acopladas e amassadas. As mesmas foram adaptadas a uma prensa convencional destinada a ensaios de compressão simples em solo, com o objetivo de obter os limites de deformações individuais (Figura 3.15).

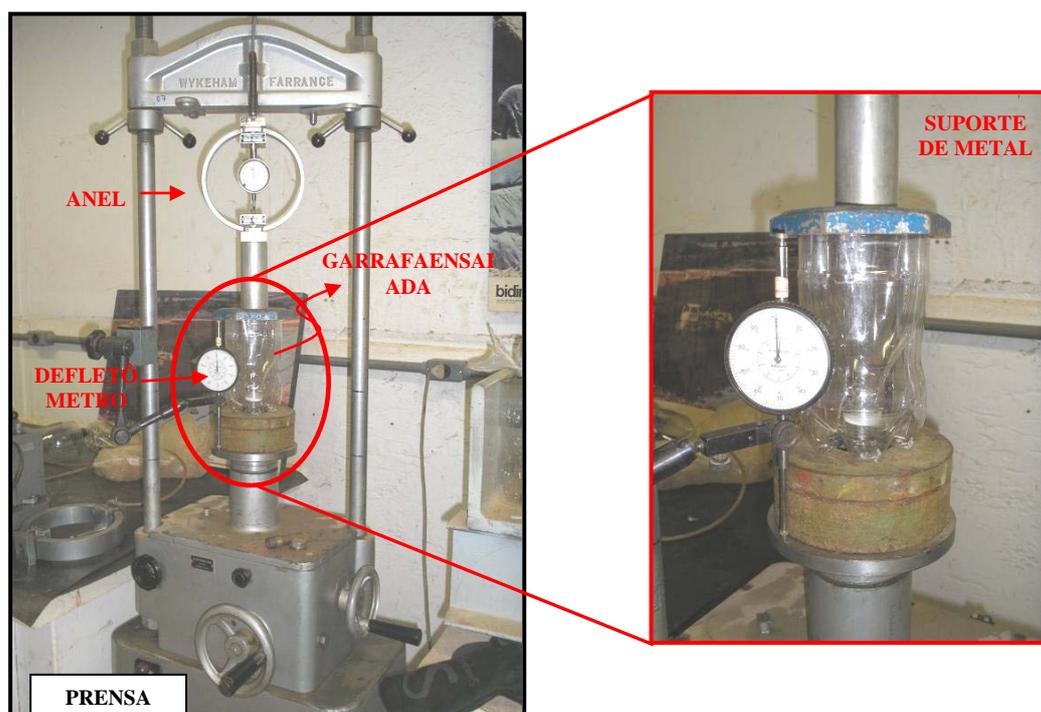


Figura 3.15 - Procedimento do ensaio de compressão individual (Silva, 2007).

Os ensaios de compressão individual seguiram o procedimento normalmente adotado em ensaios de compressão simples em corpos de prova de solo. Para aplicação da carga axial, foi utilizada uma prensa munida de anel com capacidade máxima de 500 Kgf, uma placa metálica cilíndrica de  $\varnothing = 12\text{cm}$  e um defletômetro de  $0,01\text{mm/div}$ . Este foi posicionado no prato inferior da prensa, para a realização das leituras de deslocamento axial ocorrido no material conforme o aumento das cargas.

### 3.5.2.2- ENSAIOS DE COMPRESSÃO DO CONJUNTO

Para melhor conhecimento do comportamento dos arranjos formados pelas garrafas Pet, foram realizados ensaios de compressão nos conjuntos: cortadas-acopladas, inteiras e amassadas. As garrafas foram dispostas em uma célula de aço com adaptação de uma viga de reação e uma placa de aço de  $\varnothing 0,65\text{m}$  para aplicação da carga no estado semi-confinado. As cargas aplicadas foram medidas por meio de uma célula de carga, e os deslocamentos medidos por defletômetros posicionados de maneira a formar um triângulo entre eles (Figura 3.16). Ressalta-se que esse ensaio não teve o objetivo de simular o comportamento real dos arranjos (PET+brita), pois as condições impostas de geometria e de contorno do campo não foram fielmente importadas para o laboratório. Buscou-se apenas ter um melhor entendimento do comportamento dos arranjos que utilizaram as garrafas Pet em sua configuração.

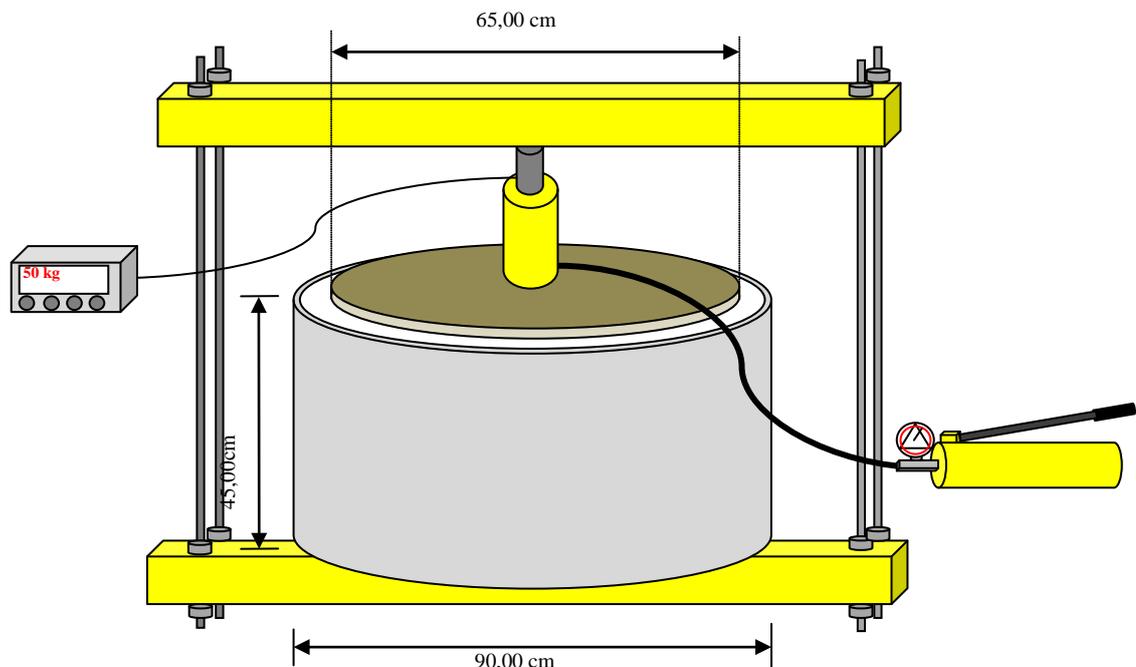


Figura 3.16 – Equipamento do ensaio de compressão dos conjuntos.

### 3.5.3- CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DAS TRINCHEIRAS

Após a escavação manual das trincheiras, realizaram-se as montagens conforme os passos descritos por Silva (2007), iniciando do fundo da trincheira (Figura 3.17):

- a) Colocação de geotêxtil OP-40 em contato com o solo para permitir a distribuição e manutenção do fluxo;
- b) Camada de brita 02 para auxiliar na distribuição do fluxo e impedir contato direto das garrafas com o solo;
- c) Revestimento de toda a trincheira com OP-20, para ajudar na manutenção, distribuição do fluxo e na estabilidade da trincheira contra pequenos desprendimentos do solo;
- d) Posicionamento da instrumentação, colocação do piezômetro no eixo central da trincheira;
- e) Montagem dos arranjos utilizando garrafas Pet;
- f) Colocação de uma camada de georrede sobre as garrafas com abertura de malha de 7 mm de espessura nominal Tipo GN 1250, de modo a impedir a passagem da brita;
- g) Colocação de camada de brita 02 com espessura conforme a altura das colunas de garrafas Pet usadas em cada trincheira;
- h) Montagem de um tubo de 100 mm no topo da trincheira até atingir a cota da camada de brita, abaixo do geotêxtil superior. Esse tubo foi usado no enchimento das trincheiras com caminhão pipa;
- i) Fechamento do topo da trincheira com geotêxtil OP-20;
- j) Colocação de uma camada de areia de 10 cm, recobrindo a trincheira, com objetivo de filtrar, impedindo a entrada de sólidos na trincheira;

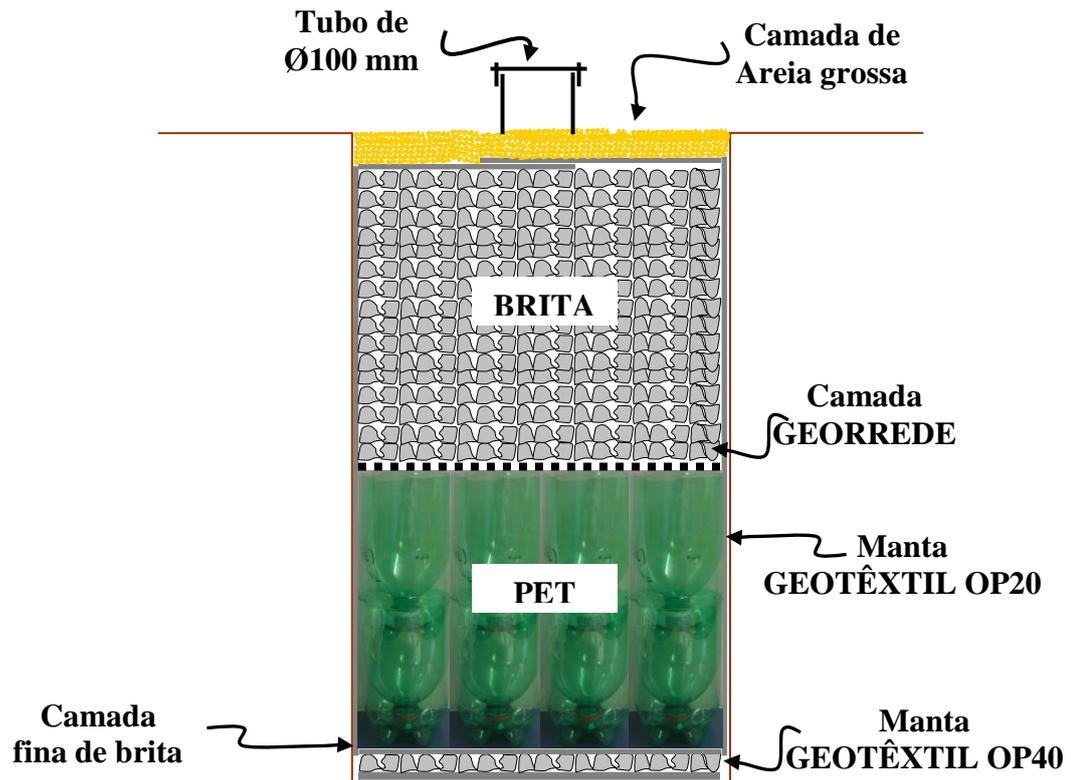


Figura 3.17– Sistema de montagem das Trincheiras (SILVA,2007).

No campo foram montados os modelos cujas dimensões e características de disposição então apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Dimensões e características das células construídas.

		Dimensões				Características dos arranjos			OBS:
		Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Quant. (uni)	Peso (Kg)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	
T1	Pet	2,01	0,83	0,70	1,17	1665	83,2	0,70	
	Brita	2,01	0,83	0,93	1,56	-	2392,0	15,04	Pca+
	Areia	2,01	0,83	0,10	0,17	-	243,3	14,04	Brita
	Total	2,01	0,83	1,73	2,90	-	2718,5		
T2	Pet	2,06	0,84	0,35	0,61	627	31,3	0,50	
	Brita	2,06	0,84	1,23	2,13	-	3215,5	14,81	Pca +
	Areia	2,06	0,84	0,10	0,10	-	243,7	13,91	Brita
	Total	2,06	0,84	1,68	2,91	-	3490,5		
T3	Pet	1,87	0,82	1,20	1,83	2880	144,0	0,77	
	Brita	1,87	0,82	0,34	0,51	-	1313,4	18,26	Pca +
	Areia	1,87	0,82	0,10	0,15	-	241,5	15,79	Brita
	Total	1,87	0,82	1,64	2,49	-	1698,9		
T4	Pet	-	-	-	-	-	-	-	
	Brita	1,87	0,89	1,69	2,81	-	3626,3	12,66	Brita
	Areia	1,87	0,89	0,10	0,17	-	237,5	13,71	
	Total	1,87	0,89	1,79	2,98	-	3863,8		
T5	Pet	2,00	0,82	1,47	2,41	784	39,2	0,16	
	Brita	2,00	0,82	0,35	0,57	-	669	11,51	Pi +
	Areia	-	-	-	-	-	-	-	Brita
	Total	2,00	0,82	1,82	2,98	-	708,2		
T6	Pet	-	-	-	-	0	-	-	
	Brita	-	-	-	-	-	-	-	Tijolo
	Areia	-	-	-	-	-	-	-	Crivo
	Total	2,00	0,78	1,80	2,88	-	-	-	
T7	Pet	1,98	0,80	0,80	1,27	2185	113,2	0,87	
	Brita	1,98	0,80	0,95	1,50	-	2622,5	17,15	Pa +
	Areia	1,98	0,80	0,05	0,08	-	105,1	12,89	Brita
	Total	1,98	0,80	1,80	2,85	-	2840,8		

Legenda: Pca = PET cortada-acoplada, Pi = PET inteira, Pa = Pet amassada

Os arranjos utilizados no preenchimento das células foram configurados de formas diferenciadas: algumas células foram preenchidas com PET e brita 2, variando de uma para outra a proporção entre estes dois materiais. Outras tiveram configurações convencionais, uma foi inteiramente preenchida com brita 2 e a outra, composta por paredes de tijolos furados e sem preenchimento (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 - Tipos de arranjos.

	Trincheira						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Altura de PET (m)	0,70	0,35	1,20	-	1,47	-	0,80
Figura	3.18	3.19	3.20	3.21	3.22	3.23	3.24

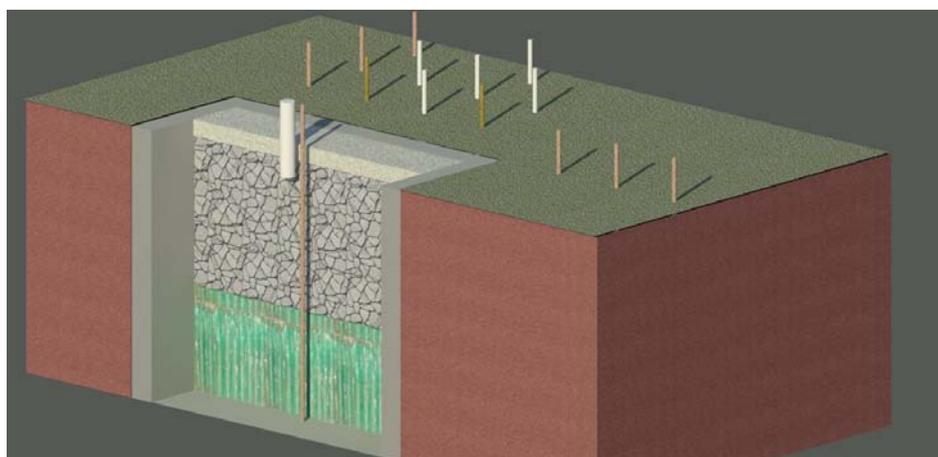


Figura 3.18 – (T1) Trincheira 1 – arranjo com 0,7m de PET (garrafas cortada/furada/acoplada) + brita + areia.

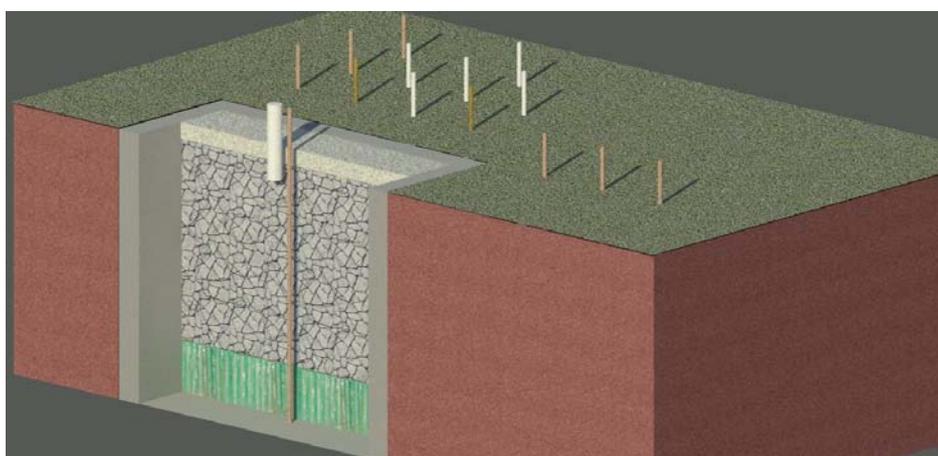


Figura 3.19 – (T2) Trincheira 2 – arranjo com 0,35m de PET (garrafas cortada/furada/acoplada) + brita + areia.

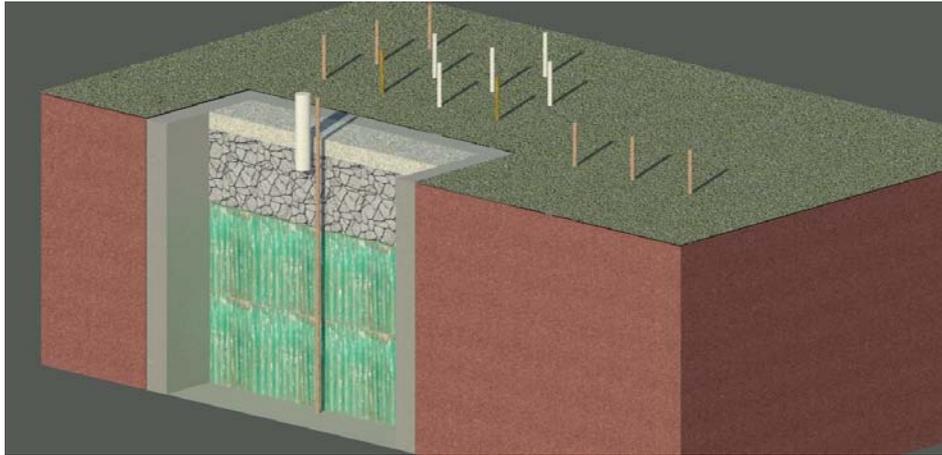


Figura 3.20 – (T3) Trinchera 3 – arranjo com 1,2m de PET (garrafas cortada/furada/acoplada) + brita + areia.

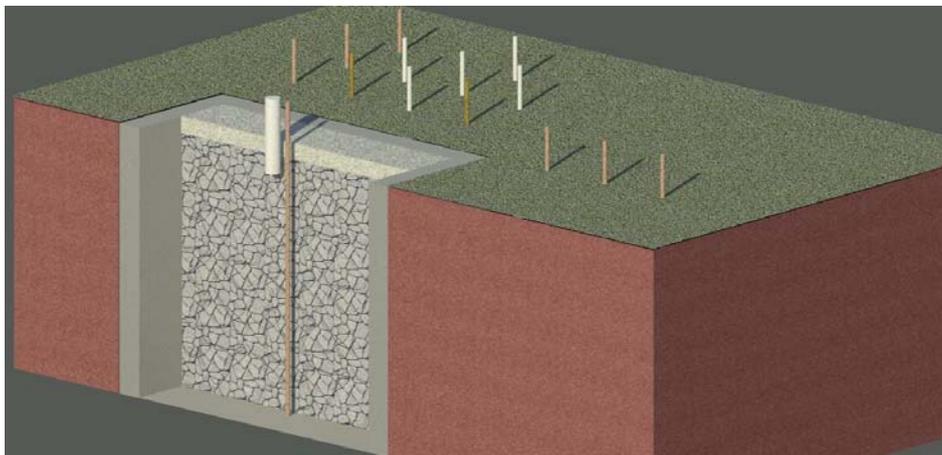


Figura 3.21 – (T4) Trinchera 4 – arranjo brita + areia.

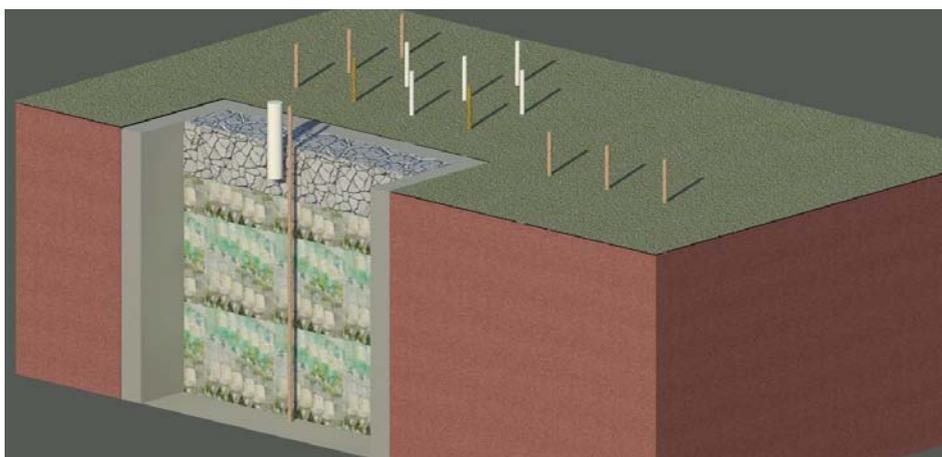


Figura 3.22 – (T5) Trinchera 5 – arranjo com 1,47m de PET (garrafas inteiras fechadas com tampa) + brita + areia.

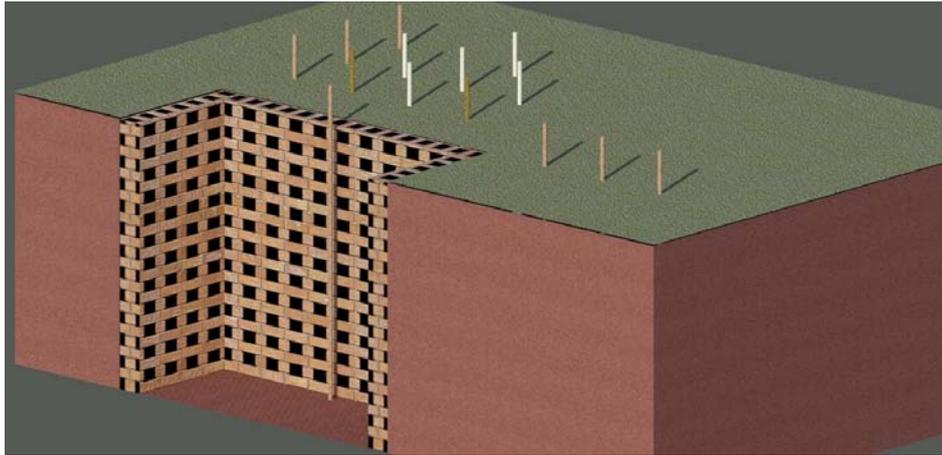


Figura 3.23– (T6) Trincheira 6 – arranjo com tijolos em crivo.

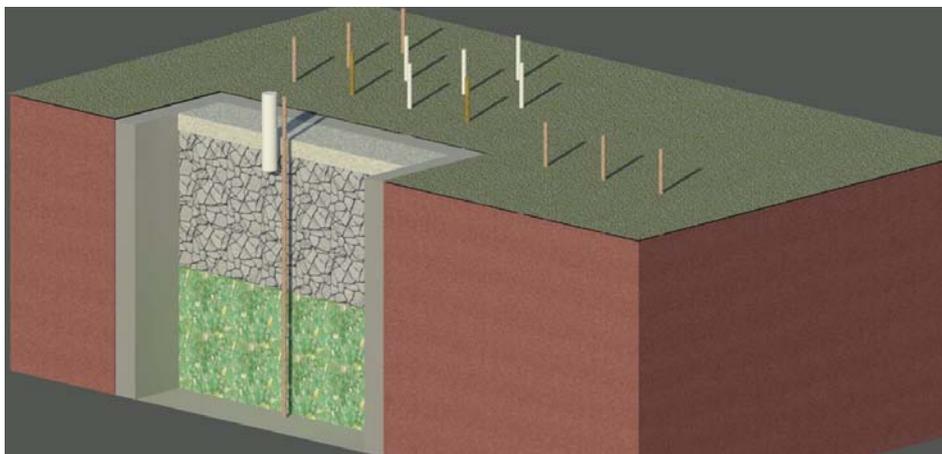


Figura 3.24– (T7) Trincheira 7 – arranjo com 0,8m de PET (garrafas amassadas) + brita + areia.

As células com arranjos convencionais, preenchidas com brita e estilo caixote (tijolos em crivo), possuem, nesta pesquisa, o objetivo de servirem como parâmetro comparativo com as demais que se apresentaram com arranjos diferenciados e alternativos, utilizando garrafas Pet. Essas células convencionais destacam-se por apresentar índices de vazios máximo e mínimo; a com brita possui um menor volume de macroporos em relação às demais e a de tijolo em crivo apresenta-se totalmente vazia, apenas com os tijolos em sua lateral, ou seja, permite um máximo de acumulação.

### 3.5.4- INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO

Buscando monitorar adequadamente as células, de forma a obterem-se resultados de armazenamento, de infiltração e de comportamento da água no solo, optou-se pela utilização de piezômetros tipo Casagrande, tensiômetros eletrônicos, os com vacuômetro e sensor de nível para acompanhar o enchimento e rebaixamento dentro das trincheiras. O Anexo A apresenta um croqui das instrumentações implantadas.

#### 3.5.4.1- PIEZÔMETROS TIPO CASAGRANDE

Para a medida da poropressão *in situ*, utilizaram-se piezômetros. Existem no mercado diversos tipos desse equipamento, que podem ser distribuídos em três grupos, de acordo com a forma utilizada na medida da pressão neutra. Assim, têm-se os piezômetros de tubo aberto, os pneumáticos e os elétricos.

Os piezômetros de tubo aberto são os mais simples. O modelo construído por Casagrande é o mais conhecido e utilizado. Nesse sistema de controle, a água penetra no piezômetro através do tubo poroso para estabelecer, após algum tempo, o equilíbrio entre interior e o exterior do tubo. Quando isso ocorre, mede-se o nível d'água por um sistema detector. No presente estudo, como o nível d'água é variável, fixou-se o controle o mais contínuo possível.

O nível d'água foi verificado com a utilização do medidor elétrico de nível no 102 da Marca *Solinst*, que possui um sensor na extremidade de uma fita graduada, com precisão em mm, e capacidade para medir até 100m de profundidade. Quando a sonda entra em contato com a água, o circuito é fechado, ativando um alarme sonoro e luminoso. O nível da água é então determinado pelo comprimento indicado no cabo.

Os piezômetros implantados por Silva (2007) foram retirados para evitar caminhos preferenciais e a sua locação foi reformulada de maneira a aumentar a área monitorada e diminuir pontos de armazenamento de água. Nos novos modelos, para evitar caminhos preferenciais no corpo dos piezômetros, optou-se por utilizar como área de captação e medição apenas os últimos 10 cm do equipamento (Figura 3.25).

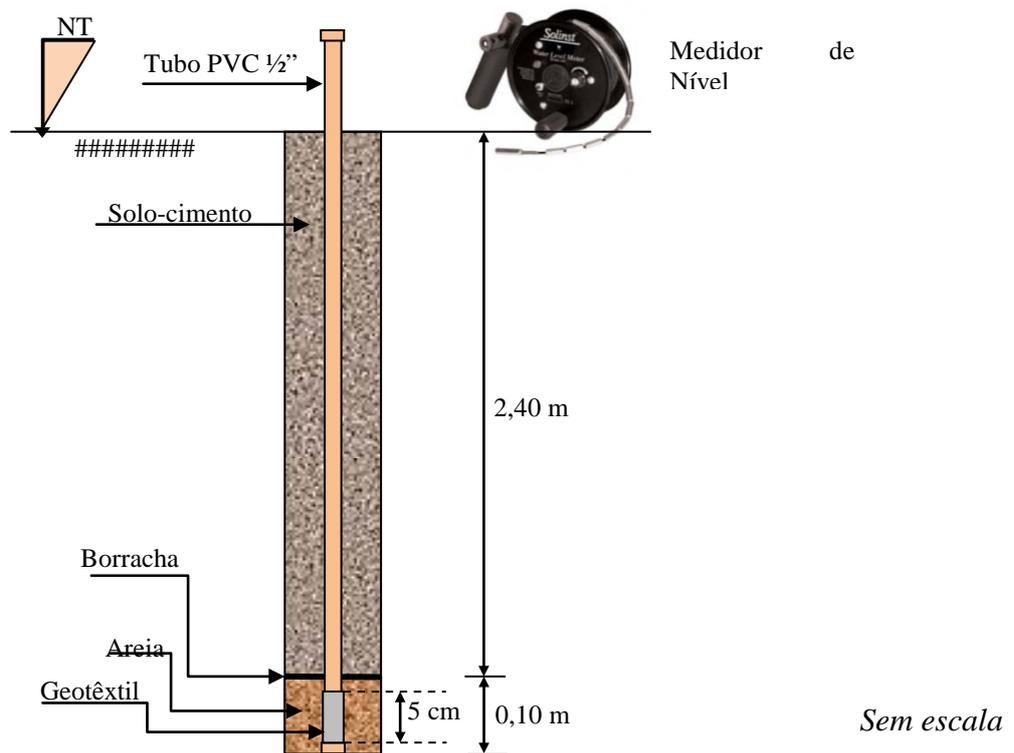


Figura 3.25 – Esquema de montagem dos piezômetros.

Foram instalados seis piezômetros em cada trincheira (afastados 0,5 m entre si) e três em cada uma das direções da trincheira (Figura 3.26). Para estabelecer uma referência, foram realizadas leituras antes do início dos ensaios de enchimento denominadas leituras zero. Após, as leituras dos piezômetros foram realizadas a partir do início do ensaio de enchimento em cada trincheira. Dado início ao ensaio, foram realizadas leituras a cada 15 minutos nos seis piezômetros instalados seguindo a sequência numérica, iniciando as leituras do P1 (piezômetro 1) e finalizando no P6 (piezômetro 6).

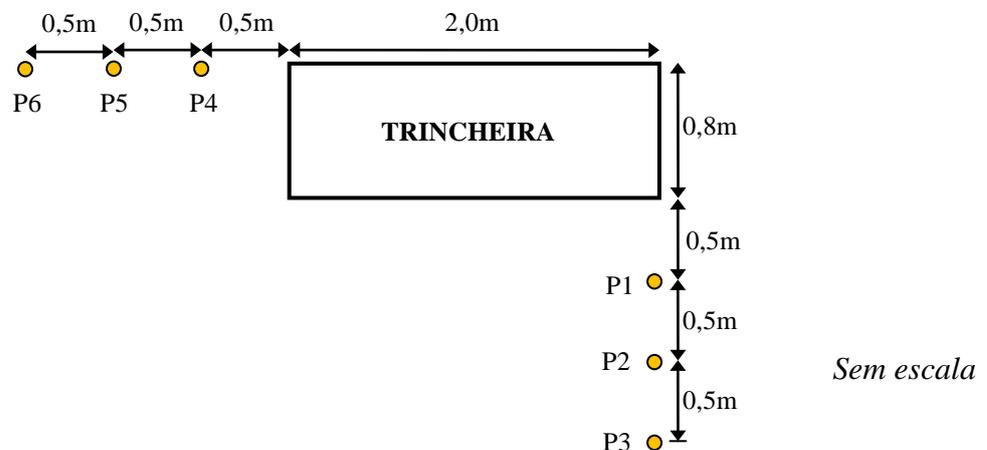


Figura 3.26 – Vista superior da trincheira, layout de localização dos piezômetros.

### 3.5.4.2- TENSIOÔMETROS

Nesta pesquisa, foram implantados dezessete tensiômetros com vacuômetro e utilizados cinco tensiômetros eletrônicos da marca Eijkelkam. Os Tensiômetros com vacuômetro, após sua implantação, permaneceram de forma fixa nas trincheiras, enquanto que os tensiômetros eletrônicos foram implantados nas trincheiras 2 ou 3 horas antes dos ensaios de enchimento da trincheira em estudo e, 2 ou 3 horas após a finalização do ensaio, eram retirados para a saturação e utilização na trincheira seguinte.

O tensiômetro com vacuômetro consiste em um tubo impermeável, com um sensor na extremidade superior, e um copo poroso na parte inferior. O tudo foi preenchido com água deaerada e a pedra porosa saturada com alta pressão de borbulhamento enterrada no solo, apenas o sensor exposto para leitura. Por se tratar de tensiômetros fixos, o monitoramento e a manutenção tornaram-se necessários rotineiramente durante toda a pesquisa. Na sua instalação, foram tomados cuidados com relação à saturação, calibração e implantação no campo. Para a saturação, foram depositados em um recipiente com água limpa deaerada (ou fervida) e filtrada, por 24 horas, para que por gravidade a água no recipiente migrasse para o tubo do tensiômetro (Figura 3.27a). Ao levá-los para o campo, evitou-se o ressecamento da ponta. Na calibração, preencheu-se o tensiômetro com água deaerada até 2cm da borda (Figura 3.27b) e, com a utilização de um seringa, provocou-se um vácuo (Figura 3.27c). O ponteiro do vacuômetro se movimentou e manteve o vácuo por alguns segundos. Repetiu-se o vácuo forçado por 3 à 4 vezes. Após este procedimento, completou-se o volume de água até a borda do instrumento, fechando-o com a vedação e a tampa (Figura 3.27d).

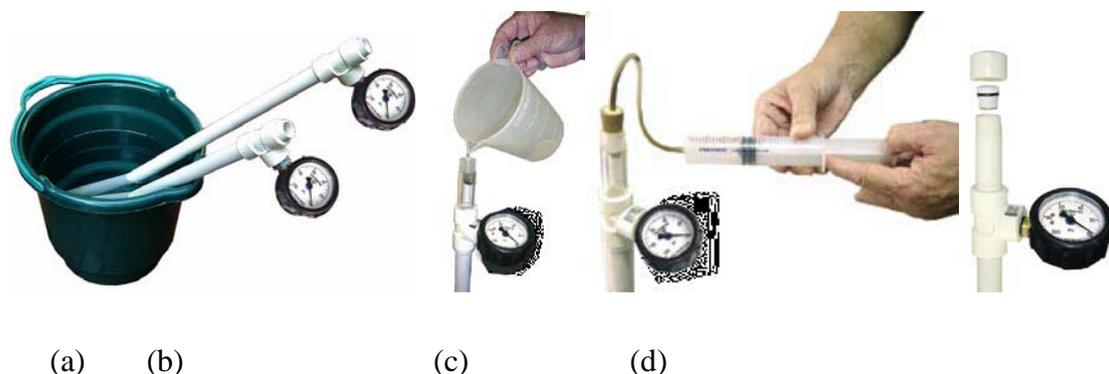


Figura 3.27 – Procedimento de saturação e calibração dos tensiômetros com vacuômetro (TRACOM, 2011).

Após estas etapas, realizou-se a implantação no solo (Figura 3.28).

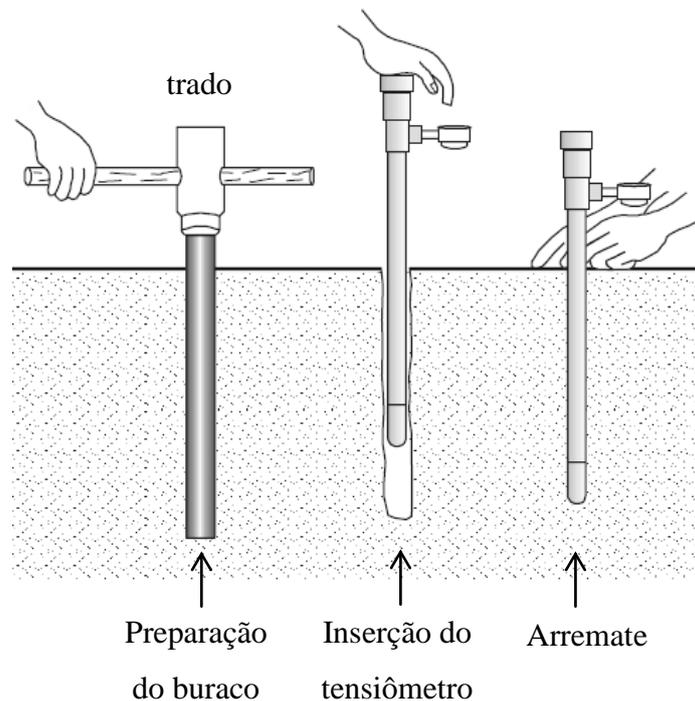


Figura 3.28 – Procedimento de implantação dos tensiômetros com vacuômetro (Adaptado por Azevedo *et al.*, 1983).

A disposição de implantação, com distâncias e profundidades, está apresentada na Figura 3.29 e na Tabela 3.6. Cabe destacar que foram implantados três tensiômetros com vacuômetro em cada trincheira: um do lado direito e dois do lado esquerdo. Como a área de implantação fica em uma região muito movimentada, alguns tensiômetros apresentaram defeitos e quebras, inutilizando-os para uso. Assim, algumas trincheiras apresentam apenas dois tensiômetros implantados.

As leituras dos tensiômetros tinham como referência o início do ensaio de enchimento e eram realizadas a cada 15 minutos na sequência numérica de T1, T2 e T3, conforme apresentado na Figura 3.29.

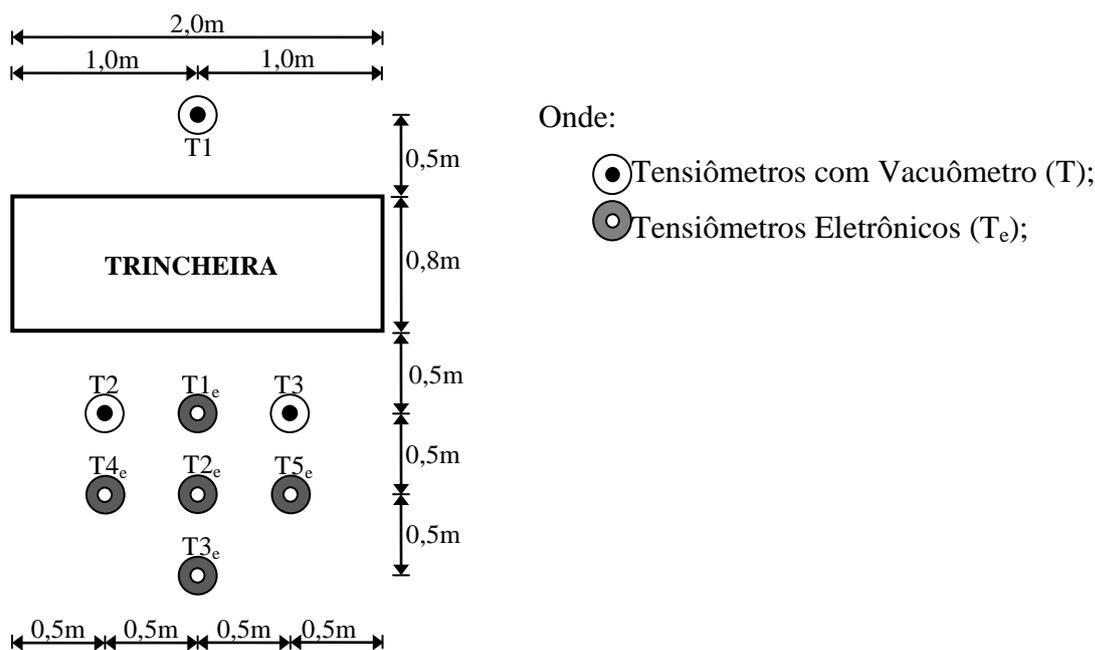


Figura 3.29 – Vista superior da trincheira, layout de localização dos tensiômetros.

Tabela 3.6 – Profundidades dos tensiômetros fixos.

		Trincheiras						
		1	2	3	4	5	6	7
		Profundidades (m)						
Tensiômetros Vacuômetro	T1	0,8	1,3	0,8	1,3	0,8	1,3	0,8
	T2	1,3	1,3	0	1,3	0	0	0,5
	T3	0,5	0,5	1,3	0	1,3	1,3	1,3

A aplicação do tensiômetro eletrônico no campo compreende as seguintes etapas: saturação, instalação e aquisição de dados. Antes de se iniciar a saturação, o copo cerâmico poroso deve ser desconectado do corpo do tensiômetro. A saturação do tensiômetro é realizada com a aplicação de vácuo de aproximadamente 80 kPa no copo cerâmico poroso imerso parcialmente em água. Foi utilizada, nesta pesquisa, uma bomba de vácuo para aplicação da pressão, conforme ilustrado na Figura 3.30. Essa etapa remove as bolhas de ar que estão presentes no copo cerâmico e nas imperfeições da parede do tubo. O copo cerâmico deve ser novamente conectado ao corpo do tensiômetro, com cuidado, procurando manter a ponta

cerâmica saturada com água. Feita a conexão, o copo cerâmico deve permanecer imerso em uma cápsula com água até sua instalação no campo. Se ocorrerem bolhas no tensiômetro antes da sua instalação, todo o processo de saturação deve ser repetido. Cabe ressaltar que o procedimento de saturação foi sempre realizado no dia anterior ao de sua instalação em campo.



Figura 3.30 – Saturação do tensiômetro (Silva Junior, 2011).

Utilizando um trado manual de  $\varnothing = 0,05\text{m}$ , foram realizados furos com profundidades diferentes. Ressalta-se que as profundidades e as distâncias foram fixadas para todas as trincheiras. Os tensiômetros eletrônicos puderam ser instalados no campo segundo a disposição prevista na Figura 3.29. Esta disposição foi realizada com o objetivo de melhor acompanhar a frente de umedecimento. Três foram dispostos na mesma profundidade, mas em diferentes distâncias da trincheira ( $T1_e$ ,  $T2_e$  e  $T3_e$ ); outros três, com a mesma distância da trincheira, mas em profundidades distintas ( $T2_e$ ,  $T4_e$  e  $T5_e$ ), (Tabela 3.7). As leituras foram realizadas a cada 30 segundos e armazenadas no *datalogger*. Os resultados podiam ser acompanhados em tempo real ou tratados separadamente após a finalização do ensaio.

Tabela 3.7 – Profundidades dos tensiômetros móveis.

Tensiômetros Eletrônicos	T1 <sub>e</sub>	T2 <sub>e</sub>	T3 <sub>e</sub>	T4 <sub>e</sub>	T5 <sub>e</sub>
Profundidade (m)	2,0	2,0	2,0	3,0	1,0
Distância da trincheira (m)	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0

### 3.5.4.3- PERFIL DE UMIDADE

Com a utilização de trados manuais de diâmetro de 0,05m, foram coletadas amostras a uma distância de 0,50m das trincheiras, a cada 0,50m de profundidade a partir da superfície, até uma profundidade de 3,0m, para a determinação do perfil de umidade antes e após o enchimento das trincheiras. Estas amostras de solo foram levadas ao laboratório para realização das pesagens e secagem em estufa. Os teores de umidades foram obtidas pelo método gravimétrico.

### 3.5.4.4- MONITORAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA

Para o monitoramento do nível d'água durante o ensaio de enchimento, utilizou-se um sensor adequado para aplicações industriais de medição de pressão em líquidos e gases, Modelo TR-511 na faixa de 0 a 1bar, do fabricante Novus (Figura 3.31). Ele tem por finalidade determinar a altura de líquidos dentro de recipientes. Esse sensor, que possui pressão máxima de 10mca e precisão de 0,01mca, foi acoplado a um tubo de PVC (para evitar ser molhado) e conectado a um sistema de aquisição de dados e a um computador para visualização e tratamento dos dados. O sensor acoplado ao tubo de PVC foi introduzido em um tubo de maior diâmetro posicionado na vertical no centro da trincheira, onde se acompanhou o aumento do nível d'água durante o enchimento e a diminuição do nível d'água e o rebaixamento devido a infiltração da água (Figura 3.32).



Figura 3.31 – Transmissor de pressão, TR-511.

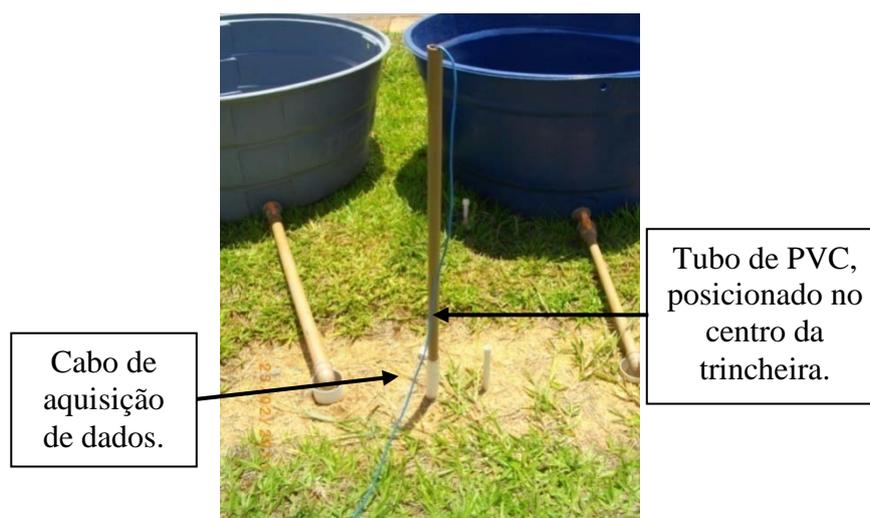


Figura 3.32 – Posicionamento do sensor de nível na trincheira.

### 3.5.4.5- ANÁLISE QUÍMICA DA UTILIZADA NOS ENSAIOS

Para a realização dos ensaios de enchimento, foi necessária a utilização de 25 caminhões pipa, carregados com 11.000 litros d'água cada. Visto que os ensaios foram realizados em épocas distintas do ano, deparou-se com a necessidade de conhecer a procedência da água desses caminhões, pois conhece-se que cada empresa fornecedora de água possui um sistema e um ponto de abastecimento próprio.

Diante do exposto, foram realizados ensaios de caracterização da água. Os principais parâmetros observados foram: pH, cor, turbidez, condutividade, cloretos, alcalinidade, oxigênio, dureza, TDS, ferro total, cálcio e magnésio.

### 3.6- ENSAIOS DE ENCHIMENTO

Com o objetivo de quantificar a infiltração, o volume armazenado e o tempo de enchimento e de esvaziamento proporcionados por uma trincheira, foram realizadas 4 (quatro) etapas de ensaios denominados ensaios de enchimento. Estes ensaios possuem a seguinte atividade: realização do enchimento total das sete células (utilizando um caminhão pipa de 11.000 litros d'água para cada uma), cronometrando o tempo de enchimento e de esvaziamento de cada uma delas. A partir do início do ensaio foram monitorados os tempos de enchimento e esvaziamento das trincheiras, os volumes e as leituras dos instrumentos conectados. Controlaram-se o sensor de nível dentro da trincheira, os piezômetros, os tensiômetros eletrônicos e os tensiômetros com vacuômetro.

Cada trincheira foi ensaiada durante um dia (8:00 às 18:00 horas). Anteriormente ao início do ensaio de enchimento, eram necessárias a realização de calibrações e verificações dos equipamentos. Tal fato só requeria um tempo específico. A montagem dos tensiômetros eletrônicos, a coleta do perfil de solo para a determinação das umidades e a montagem de todos os aparatos necessários para a realização do ensaio levavam um tempo entre 3 e 4 (três e quatro) horas para a sua finalização, atividades indispensáveis antes do início dos ensaios.

Após a montagem, iniciava-se o enchimento. Para o controle das vazões foram utilizadas 2 (duas) caixas d'água de 1.000 (mil) litros cada (Figura 3.33). Com o enchimento da primeira caixa, liberava-se o volume dessa em direção à trincheira utilizando uma tubulação de  $\varnothing = 60\text{mm}$ , despejando em tubos de  $\varnothing = 100\text{mm}$  conectados à trincheira, sendo este momento adotado como  $t=0$ , início do enchimento da trincheira. Em sequência, enquanto uma caixa estava sendo esvaziada (enchendo a trincheira), a outra era preenchida novamente pelo caminhão pipa. Seguiu-se este procedimento até o enchimento e esvaziamento total de 11 caixas d'água. Nesse momento, anotava-se como o fim do enchimento e o fim do rebaixamento eram indicados pelo sensor de nível, quando o aparelho apresentava altura de água 0m (zero) dentro da trincheira.

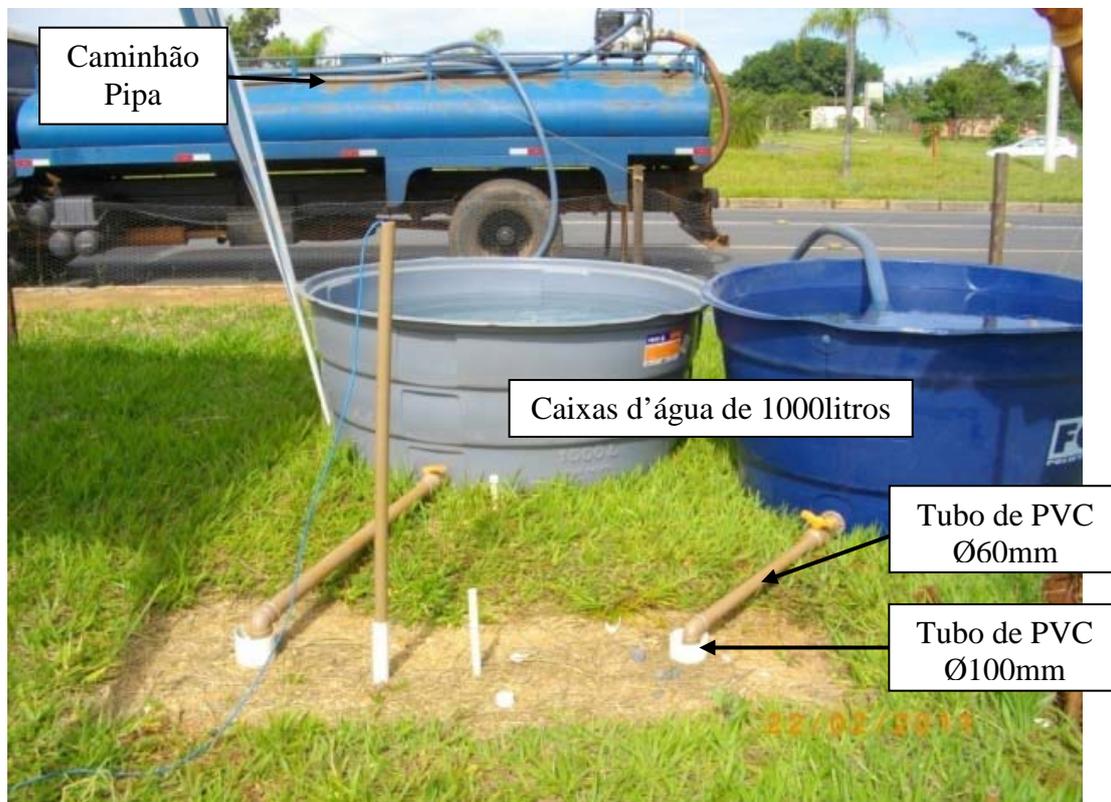


Figura 3.33 – Utilização de caminhão pipa e de caixas d'água no ensaio de enchimento.

Após indicado o fim do rebaixamento pelo sensor de nível, realizava-se a coleta do perfil de solo para determinar a umidade após o ensaio.

Os ensaios de enchimento nas células seguiram uma sequência que procurou evitar a sobreposição de infiltração no solo pelas células vizinhas. Assim, tem-se como exemplo: 1ª etapa (1º dia trincheira 1, 2º dia trincheira 3, 3º dia trincheira 5, 4º dia trincheira 7, 5º dia trincheira 2, 6º dia trincheira 4 e 7º dia trincheira 6).

### 3.7- PROVAS DE CARGA

As provas de carga foram realizadas no Campo Experimental da Universidade de Brasília, que apresenta perfil típico do solo poroso e colapsível da região.

Com a finalização das etapas de enchimento, foram realizadas provas de cargas, aplicadas no eixo das trincheiras e no solo, neste distante 2,0m da borda da célula, utilizando-se, para tanto, um sistema de reação, um sistema de aplicação de carga e de defletômetros para medição dos deslocamentos.

Foram realizadas 12 (doze) provas de carga, seguindo as recomendações da norma NBR 12131/2006, em carregamento rápido. Foram selecionadas três trincheiras de preenchimentos diferenciados, mas com utilização de garrafas Pet (trincheiras 3, 5 e 7). As provas de cargas acompanharam a última etapa dos ensaios de enchimento, realizaram-se provas de cargas antes e após cada enchimento realizado. A Figura 3.34 apresenta o croqui de disposição das células ensaiadas.

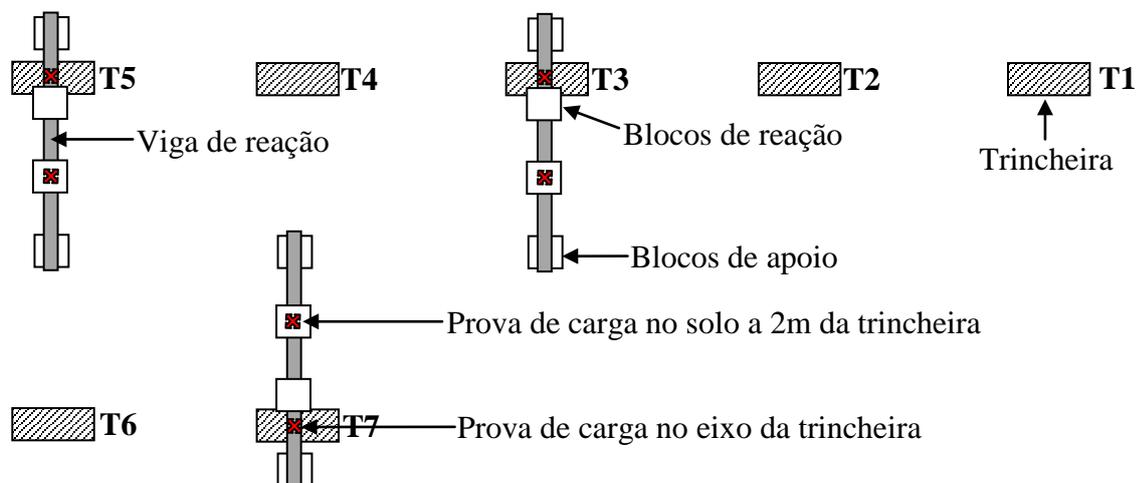


Figura 3.34 – Disposição das provas de carga.

O sistema de reação utilizado era composto por uma viga metálica de 8m de comprimento com perfil I e peso aproximado de 1.500 kg; dois blocos de concreto com 0,8x0,8x0,8m de dimensões e peso aproximado de 800 kg cada (Figura 3.35).



Figura 3.35 – Vigas e blocos de reação das provas de cargas.

Para aplicação das cargas, utilizaram-se uma placa metálica de  $\varnothing = 0,30\text{m}$ , um macaco hidráulico manual com capacidade de 25 toneladas de carga, uma célula de carga com capacidade 20.000 kgf munida de unidade leitora e precisão de 0,1kg (Figura 3.36).



Figura 3.36 – Sistemas de aplicação e medição de carga.

Para a medição dos deslocamentos, foram utilizados três defletômetros dispostos de forma triangular sobre a placa metálica, com cursor total de  $8 \cdot 10^{-2}$  m e precisão de  $10^{-5}$  m (Figura 3.37).



Figura 3.37 – Disposição dos defletômetros nas provas de cargas.

### 3.8- DADOS METEOROLÓGICOS DA ÁREA

Para a aquisição de dados meteorológicos, utilizaram-se de dados coletados em uma estação meteorológica, modelo U30, da marca Campbell Scientific, que possui 10 metros de altura e localizada no campo experimental do programa de Pós-graduação em Geotecnia da UnB, ao lado da área de construção das trincheiras de infiltração (Figura 3.38).



Figura 3.38 – Estação meteorológica na área em estudo.

A estação é composta por uma torre de estrutura tubular de alumínio onde são fixados os sensores de temperatura e umidade do ar. Implantados no solo, os sensores de umidade e temperatura e em uma haste próxima, é depositado o pluviômetro. Os dados foram registrados em intervalos de 15 minutos e a cada 24 horas: ano, dia, hora e minuto; armazenados em um registrador de dados, modelo Datalogger CR10X, marca Campbell Scientific, localizado na torre e protegido por uma caixa de alumínio. Esse registrador, além de armazenar as medidas em intervalos configuráveis, realiza cálculos com os valores obtidos. Estes dados foram coletados a cada 30 dias (tempo máximo de armazenamento de dados). As especificações dos equipamentos estão na tabela 3.8.

Cada equipamento instalado na estação denomina-se com referência à medição que realiza, como: sensores de temperatura do ar, sensores de umidade do ar, sensores de temperatura do solo, sensores de umidade do solo e o pluviômetro que mede as chuvas.

Tabela 3.8 – Quantidade, marcas e modelos dos equipamentos utilizados na estação meteorológica.

Quantidade	Equipamento	Marca	Modelo
1	Torre de 10 metros de altura	Campbell Scientific	U30
1	Sensor de temperatura e umidade do ar	Vaisala	HMP45C
1	Pluviômetro	Hydrological Services	TB-4
1	Sensor de umidade do solo	Campbell Scientific	CS616
3	Sensores de temperatura do solo em 3 profundidades distintas: 5, 10 e 20 cm	Campbell Scientific	108
1	Registrador de dados	Campbell Scientific	Datalogger CR10X

### 3.9- TRATAMENTO GEOESTATÍSTICO DOS DADOS

#### 3.9.1- DADOS DOS ENSAIOS DE ENCHIMENTO

Após a realização dos ensaios de enchimento nas células de infiltração, tornou-se necessária a realização de tratamento estatístico, comparando-se os resultados adquiridos dos instrumentos durante os ensaios. Essas análises buscaram determinar o conjunto de dados que caracterizam

as células. Duas células apresentam estrutura convencional, uma com preenchimento de brita 02 e outra não preenchida e contida por paredes de tijolos em crivo, e foram determinadas como conjuntos de dados de referência para estas análises.

O procedimento utilizado para a análise de dados é a conhecida Análise de Variância (ANOVA). Essa análise compara um conjunto de dados de diferentes fatores que produzam mudanças sistemáticas nas médias das populações de interesse, por meio de testes de hipóteses utilizando a Distribuição de *Fisher*. Nesse processo de comparações, são determinados os conjuntos de dados que mais se aproximam do conjunto de referência das células convencionais.

### **3.9.2- DADOS DOS ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO E PERFIS DE UMIDADE**

A coleta de amostras, antes e após os ensaios de infiltração, seguiu o perfil apresentado na Figura 3.9. Após a coleta, foram determinadas as umidades pelo método gravimétrico, apresentando perfis de umidade de cada ensaio de infiltração e de enchimento. Para o tratamento e melhor visualização dos resultados encontrados, foi utilizado o módulo *GeostatisticalAnalyst* do software ArcGis 8.3 da ESRI, do qual obteveram-se as interpolações pelos métodos Inverso Ponderado da Distância (IDW-*InverseDistanceWeighted*) com potência 2 e krigagem ou krigagem. Com o objetivo de determinar o perfil de umidade que melhor representasse a realidade de campo, utilizaram-se os dois métodos de interpolação: IDW e krigagem.

Os interpoladores utilizaram de parâmetros de umidade determinados e associados às coordenadas de campo, definindo aproximadamente a função interpoladora de cada método. Considerou-se a dependência entre dados que estão próximos espacialmente, e que não se afastam muito dos pontos da função construída a partir dos dados obtidos.

Um dos métodos utilizados para interpolação dos dados é denominado “Inverso Ponderado da Distância” (IDW), faz o cálculo do valor do ponto de interesse por meio da média dos pontos mais próximos, e essa média é ponderada pelo inverso da distância aos pontos.

Outro método de interpolação também muito utilizado é a krigagem, que se diferencia de outros métodos de interpolação pela maneira da atribuição dos pesos para cada amostra. Nesse método, os pesos são determinados pela análise espacial com base no

semivariograma experimental. Geralmente, a krigagem fornece estimativas não tendenciosas e com variância mínima.

Os interpoladores atribuem pesos às amostras utilizadas nas estimativas de tal modo que o erro médio fique próximo de zero e a variância dos erros seja mínima. A estimativa de locais não amostrados a partir da coleta de dados amostrais foi feita segundo a Equação 3.3:

$$Z(x_0) = \sum \lambda_i Z(x_i) \quad (3.3)$$

Onde,  $\lambda_i$  representa os fatores de ponderação (pesos) associados a cada dado amostrado  $Z(x_i)$ .

A Equação 3.4 define o processo de cálculo do fator de ponderação do valor a ser estimado pelo interpolador IDW:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad (3.4)$$

Onde

Z = valor interpolado para o nó do reticulado (grid);

Z<sub>i</sub> = valor do ponto amostrado vizinho ao nó;

h<sub>ij</sub> = distância entre o nó da grade e Z<sub>i</sub>;

β = expoente de ponderação (peso);

n = número de pontos amostrados utilizados para interpolar cada nó.

No caso da Equação 3.4 o peso utilizado nesta pesquisa é definido pela Equação 3.5:

$$\lambda = \frac{1}{h_{ij}^2} \quad (3.5)$$

No desenvolvimento da interpolação por krigagem, após a obtenção dos dados, a primeira etapa consiste na construção de um semivariograma experimental. Segundo Camargo (1997), o semivariograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de krigagem que permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço. Para a

obtenção das análises realizadas, foram utilizados semivariogramas, chamados de modelos transitivos, do tipo gaussiano de acordo com o comportamento observado (Equação 3.6), em que a curva do gráfico tem comportamento parabólico, apresentada a seguir:

$$\gamma(h) = C \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a}\right) \right] \quad (3.6)$$

Para a krigagem, as estimativas também são feitas com a Equação 3.1; contudo, há uma mudança nas estimativas dos pesos, haja vista que, neste caso, os pesos podem ser estimados por meio da Equação 3.7:

$$[C]\{W\} = \{D\} \quad (3.7)$$

A matriz C corresponde aos valores de covariância dos pontos amostrais com eles mesmos. O vetor D consiste nos valores de covariância entre os pontos amostrais e os locais onde se deseja estimar e o vetor W correspondente aos pesos de krigagem.

Seguindo os passos do programa ARCGIS, foram inseridos os perfis de umidade determinados em campo antes e após os ensaios de infiltração. Após a interpolação, obtém-se uma visualização de corte vertical do solo da superfície até a profundidade ensaiada.

As isolinhas aparentes apresentarão as umidades referenciadas pelos interpoladores. Utiliza-se também a variação de cores para se determinar a diferenciação entre as zonas de mudança de umidade.

Cabe destacar que o posicionamento do furo principal de infiltração foi situado de forma assimétrica utilizada para inserir fluxos de água no decorrer do ensaio.

## **4- RESULTADOS**

Neste capítulo serão discutidos os resultados provenientes dos estudos de campo e de laboratório do solo da área em estudo. Os ensaios de campo preliminares identificaram as características da área onde foram construídas as trincheiras. Os ensaios de laboratório caracterizaram os solos e os arranjos utilizados na construção das trincheiras.

No Campo, foram realizados ensaios de enchimento e provas de cargas nas sete trincheiras implantadas.

Dos ensaios de infiltração com verificação da umidade, foram realizadas análises geostatísticas utilizando o ARCGIS, plotando superfícies de umidade antes e após cada ensaio. Analisando essas superfícies, verificaram-se influências significativas de umidade de um ensaio a outro.

### **4.1- ENSAIOS PARA RECONHECIMENTO DA ÁREA**

#### **4.1.1- PERMEABILIDADE EM FURO DE SONDAGEM E CILINDROS CONCÊNTRICOS**

Os ensaios, utilizando cilindros concêntricos, foram realizados na superfície do solo (profundidade tomada como zero). Para a realização desse ensaio, alguns cuidados foram necessários, tais como, a limpeza da superfície da área, a retirada da grama no local de cravação dos cilindros e a disposição de palha no fundo dos cilindros após a cravação. Ressalta-se que os cilindros determinam a permeabilidade na superfície do solo, utilizando cilindros de diâmetros diferentes.

Os ensaios de infiltração em furo de sondagem foram realizados nas profundidades de 0.5m, 1.0m, 1.5m, 2.0m, 2.5m e 3.0 m, conforme mostrado na Tabela 4.1. Cabe destacar que o furo principal onde foram realizados os ensaios de infiltração apresentava um diâmetro de 0,10m; foram escavados furos de sondagem à trado no diâmetro de 0,05m; e realizados os ensaios em profundidades distintas a partir da superfície de 0 a 0,5m à 0 a 3,0.



e secagem, pisoteio de pessoas e animais e adubação e calagem susceptíveis de facilitar a compactação. Além destes fatores, existe ainda a possibilidade dessa camada superficial de solo ter sido transportada e compactada quando do início da cidade.

#### 4.1.2- PENETRÔMETRO DINÂMICO LEVE (PANDA)

Foram realizados ensaios Panda em duas condições: uma com o solo natural e outra com solo submetido à inundação por infiltração em um furo de sondagem. A Figura 4.2 mostra, como esperado, que o solo na condição natural apresenta maior resistência de ponta que o solo na condição inundada. A menor resistência do solo inundado pode ser atribuída à eliminação da sucção e/ou à maior facilidade de quebra das ligações cimentíceas entre os agregados.

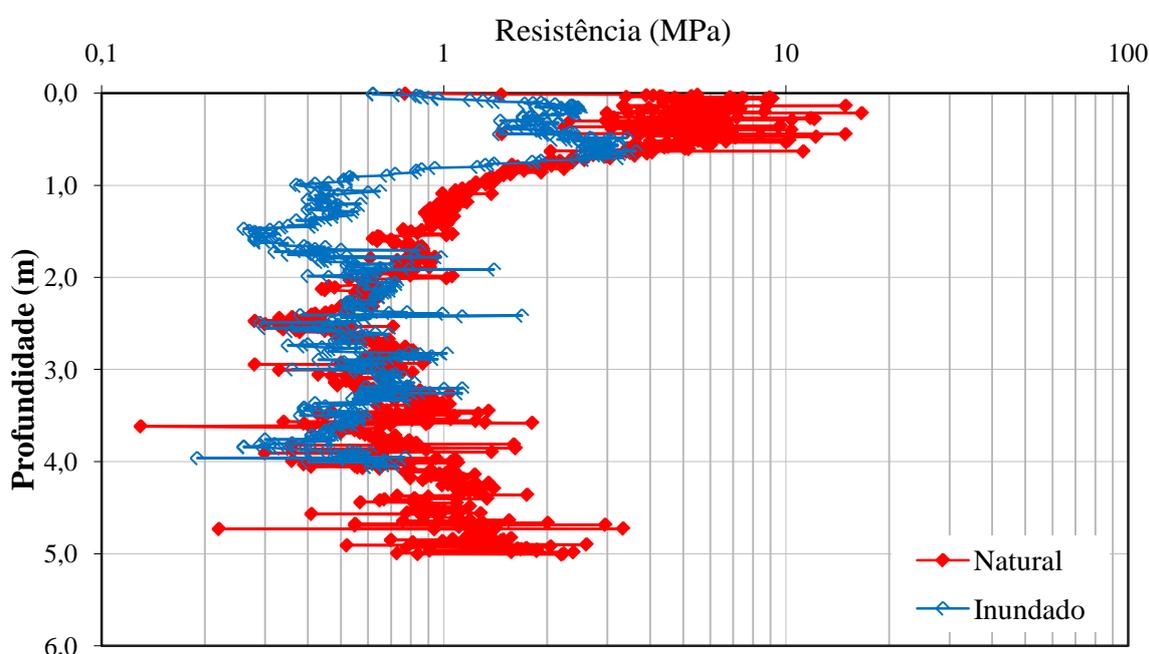


Figura 4.2 – Resistências obtidas para o perfil de solo da UnB (Silva, 2007).

Em alguns pontos, observaram-se picos de maior resistência (Tabela 4.2). Esses picos, geralmente, se devem à presença de pedregulhos no solo e, portanto, os pontos nesses locais não são considerados como representativos, dessa forma foram desprezados em relação aos demais resultados na caracterização da área. Observou-se, ainda, a presença de uma camada de cascalho localizada entre 0,1 e 0,6 m. Portanto, a camada de cascalho apresenta espessura aproximada de 0,5 m. Observa-se, dos resultados mostrados na tabela, que o menor valor para o solo no estado natural encontra-se entre 2 e 2,5 m de profundidade. Esta camada aproxima-se do limite da zona mais ativa no perfil de solo.

Tabela 4.2 – Resultados de resistência à profundidade.

Profundidade (m)	Resistência (MPa)	
	Natural	Inundado
0 a 0,5	0,7 a 16,6	0,6 a 3,4
0,5 a 1,0	1,2 a 11,2	0,3 a 3,6
1,0 a 1,5	0,7 a 1,2	0,2 a 0,6
1,5 a 2,0	0,3 a 1,0	0,2 a 0,6
2,0 a 2,5	0,2 a 0,8	0,2 a 0,7
2,5 a 3,0	0,3 a 1,3	0,3 a 0,8
3,0 a 3,5	0,1 a 1,8	0,3 a 0,7
3,5 a 4,0	0,4 a 1,7	0,1 a 0,7
4,0 a 4,5	0,2 a 3,3	-
4,5 a 5,0	0,2 a 4,6	-

## 4.2- ENSAIOS DE LABORATÓRIO

### 4.2.1- CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

A Tabela 4.3 reúne os resultados da caracterização geotécnica das amostras de solos estudadas. Entre os resultados apresentados pela referida tabela, destaca-se a porosidade da camada superficial que, por se tratar de um aterro ou camada naturalmente compactada por efeito de molhagem e secagem ao longo do tempo, apresenta dados inferiores em relação às demais.

Tabela 4.3 – Caracterização física dos solos.

Parâmetro	Profundidade (m)				
	0 a 0,5	0,5 a 1,0	1,0 a 1,5	1,5 a 2,0	2,0 a 2,5
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	26,2	26,0	25,7	26,6	26,5
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	13,4	11,8	10,6	10,4	10,1
e	0,96	1,21	1,43	1,55	1,63
n (%)	49	55	59	61	62
w <sub>nat</sub> (%)	17	20	21	23	26

Cabe destacar o peso específico dos grãos, cujos valores apresentam uma suave diminuição até a profundidade de 1,5m e um aumento após este trecho. No peso específico aparente seco, observa-se sua redução com a profundidade até 2,5m de profundidade e, no índice de vazios e na porosidade, ocorre um gradativo aumento. Cabe lembrar que a permeabilidade determinada leva nos furos de sondagem leva em consideração todo o perfil de solo até a profundidade ensaiada, considerando a parede mais o fundo do furo. Destaca-se que, devido ao fato de ser a área da ponta pequena em relação à área lateral esta não foi considerada nos cálculos do índice de vazios médio.

Observa-se, ainda, que, se considerada a permeabilidade determinada nesta pesquisa e o índice de vazios (1,27) determinado por Guimarães (2002) para a profundidade de 3 m, tem-se um ponto que se encaixa perfeitamente na tendência.

A Tabela 4.4 e a Figura 4.3, apresentam os resultados de granulometria para as amostras ensaiadas com e sem o uso de defloculante. Nesta tabela, verificou-se que, com o uso do defloculante hexametáfosfato de sódio, houve um aumento no percentual de argila, ou seja, ocorreu uma desagregação do solo e este revelou-se constituído predominantemente por partículas de argila. Observa-se uma grande quantidade de areia, acima de 70%, no ensaio sem defloculante. Tal fato mostra que aquelas partículas de argila presentes no ensaio com defloculante se encontram no solo em estado natural agregadas formando grãos de areia. Isso também foi observado para a análise no granulômetro sem ultra-som.

A Tabela 4.4 mostra, ainda, que o granulômetro fornece teores de argila nos ensaios sem o uso de ultrassom e de defloculante inferiores aos obtidos nos ensaios de sedimentação convencionais sem o uso de defloculante. Verificou-se também que os teores de argila obtidos no granulômetro a laser com o uso de ultrassom são inferiores aos obtidos nos ensaios de sedimentação convencional fazendo-se uso de defloculante. Porém o defloculante no granulômetro gera maior desagregação do solo (maior teor de argila) que quando usado no ensaio de sedimentação clássico. Como observação final, afirma-se ainda que o ultrassom tende a ampliar o teor de argila indicando desagregação complementar. Com isso pode-se dizer que a técnica de ensaio tem influência nos resultados de textura obtidos para o perfil de solo estudado nesta pesquisa e que o solo apresenta sensibilidade diferenciada quando submetida aos agentes químicos (defloculantes) e mecânico (ultrassom).

Tabela 4.4 – Análise Granulométrica dos Solos.

		Amostras				
		Profundidades (m)				
		0 a 0,5	0,5 a 1,0	1,0 a 1,5	1,5 a 2,0	2,0 a 2,5
<b>Peneiramento e Sedimentação</b>	Pedregulho (SD)	0,4	0,1	0	0	0
	Areia (SD)	83,5	81,7	78,5	82,0	75,3
	Silte (SD)	10,5	12,6	16,2	12,9	18,7
	Argila (SD)	5,6	5,7	5,3	5,1	6,0
	Pedregulho (CD)	0	0	0	0	0
	Areia (CD)	29,2	32,8	27,9	25,8	22,5
	Silte (CD)	15,1	20,2	25,3	12,5	13,0
	Argila (CD)	55,7	46,9	46,8	61,7	64,5
<b>Granulômetro a laser</b>	Pedregulho (SU)	0,1	0,1	0	0,1	
	Areia (SU)	71,5	74,7	70,9	78,3	
	Silte (SU)	26,7	22,9	27,7	19,6	
	Argila (SU)	1,7	2,3	1,4	2	
	Pedregulho (CU)	0,1	0,1	0	0,1	#
	Areia (CU)	20,9	21,7	16,5	17,1	
	Silte (CU)	61,7	62,7	59,6	53,3	
	Argila (CU)	17,4	15,5	23,9	29,5	
<b>Granulômetro a laser + Defloculante</b>	Pedregulho (SU)		0,1	0	0,1	
	Areia (SU)		3,4	1,8	17,4	
	Silte (SU)		23,3	13,5	15,7	
	Argila (SU)		73,1	84,7	66,8	
	Pedregulho (CU)	#	0,1	0	0,1	#
	Areia (CU)		3,3	1,7	2,0	
	Silte (CU)		19,7	14,4	14,1	
	Argila (CU)		76,9	83,9	83,8	

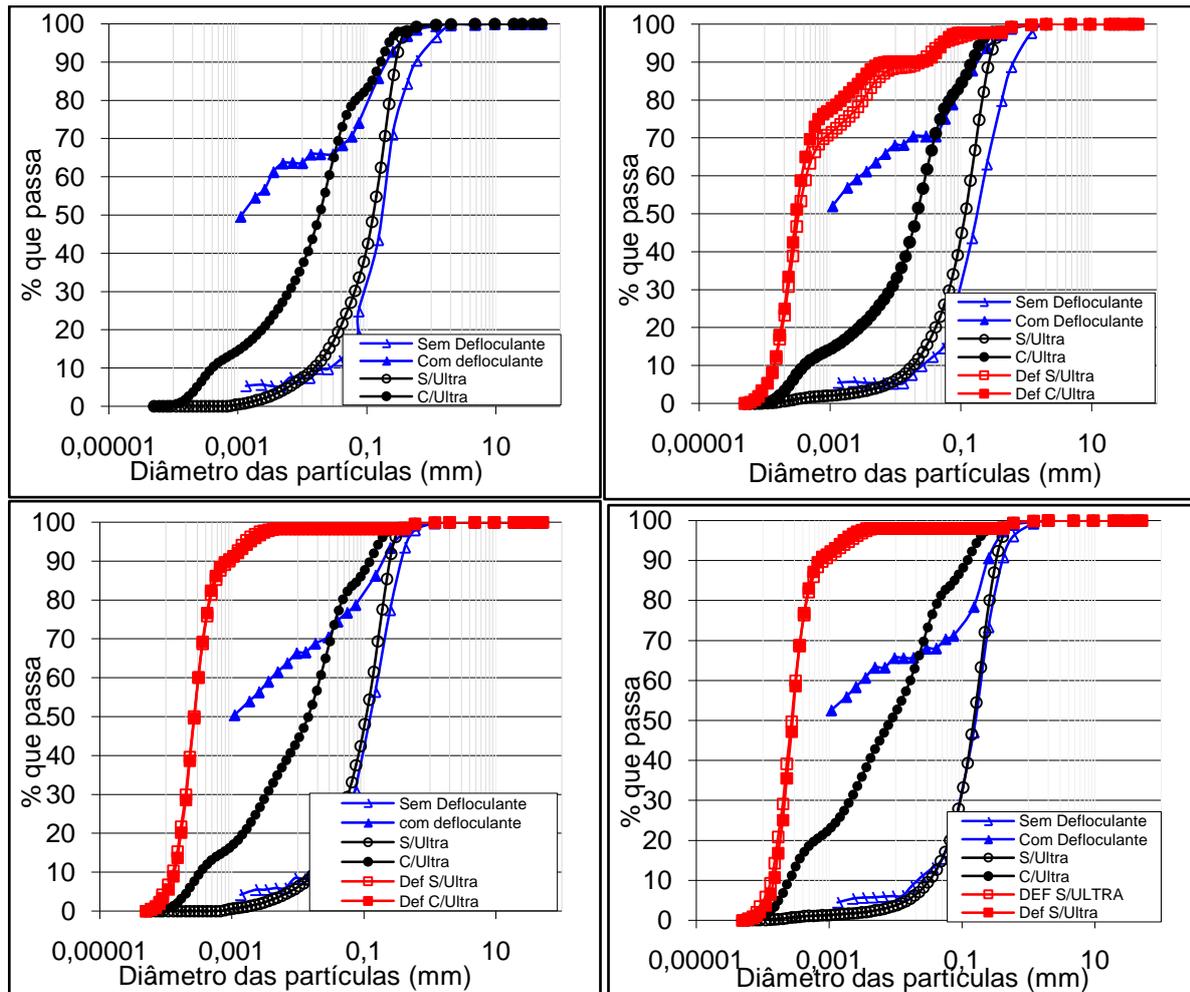


Figura 4.3 – Curvas granulométricas: a) 0,0 a 0,5m; b) 0,5 a 1,0m; c) 1,0 a 1,5m e d) 1,5 a 1,8m.

O defloculante, assim como o ultra-som, defloculou cerca de 50% da porção identificada como arenosa, sendo que com o uso do defloculante 40% em argila e 10% em silte e, com o uso do ultra-som, ocorreu o inverso, ou seja, 10% em argila e 40% em silte. Estes valores podem estar associados ao tipo de ligação existente neste solo, caracterizado como tropical.

A comparação da textura das amostras é muito importante, pois coloca em evidência o fato de que efetivamente não se deve estimar ou avaliar a permeabilidade de um solo tropical com base pura e simplesmente na textura obtida com o uso de defloculante ou ultrassom, como o apresenta a maioria dos livros clássicos de mecânica dos solos.

Na análise utilizando ultra-som, pode-se destacar a menor influência do desagregador mecânico na amostra. Após sua utilização, a caracterização, classificada anteriormente como

areia, apresentou uma classificação como silte, ou seja, cerca de 30% da amostra não apresentou desagregação pelo uso do ultra-som.

Após a desagregação química (com uso do defloculante), fez-se uso do ultra-som. Com a utilização dos dois métodos associados, verificou-se um acréscimo de 30% na quantidade de argila. Esse fato necessita de mais estudos, haja vista que o granulômetro, no seu processo de agitação, conjuntamente com a adição de defloculante, pode favorecer a quebra dos grãos mais fortemente agregados, acarretando erros nos resultados.

As análises com e sem o uso de defloculante no granulômetro mas sem o uso de ultrassom mostram-se adequadas para o estudo, uma vez que as células inicialmente são previstas para receberem água da chuva que é normalmente um pouco ácida e, portanto, não defloculante, mas, quando há risco de receber águas contaminadas, o uso do defloculante torna-se relevante. Só em estruturas submetidas à vibração mecânica, como é o caso daquelas próximas às ruas, às avenidas e às rodovias, deve-se avaliar a oportunidade de se usar o ultrassom. Enquanto o ultrassom pode dar origem a subsidências por quebra estrutural o agente defloculador pode dar origem a três fenômenos: ao da subsidência, ao da esqueletização do maciço devido à perda de finos de modo generalizado e ao da erosão interna nos casos de concentração do fluxo.

Na Tabela 4.5, são apresentados os limites de Atterberg. Os valores obtidos mostram-se de acordo com a natureza mineralógica do solo e refletem a capacidade de retenção de água. Cardoso (2002) apresenta um estudo detalhado sobre esses limites em função da intemperização sofrida pelo solo.

Tabela 4.5 – Limites de Atterberg.

Limites de Atterberg	Amostras				
	Profundidade (m)				
	0 a 0,5	0,5 a 1,0	1,0 a 1,5	1,5 a 2,0	2,0 a 2,5
$W_L$	34	38	37	38	38
$W_P$	23	23	22	24	29
IP	11	15	14	13	10

#### 4.2.2- CLASSIFICAÇÃO MCT EXPEDITA

Os solos do campo experimental foram analisados na forma expedita. Os resultados encontram-se na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Classificação MCT do solo.

Propriedades	Amostras				
	Profundidade (m)				
	0 a 0,5	0,5 a 1,0	1,0 a 1,5	1,5 a 2,0	2,0 a 2,5
$c'$	1,6	0,12	0,13	0,10	0,16
Classificação MCT	LA'-LG'	LA	LA	LA	LA

Os solos foram classificados como solos lateríticos. A camada mais superficial (de 0,0m a 0,5m) apresentou características de areia (pela alta contração encontrada); mas, no esmagamento, apresentou-se com alta resistência. Tal fato os classificou como areia argilosa laterítica (LA'-LG'). Os solos das demais camadas praticamente não apresentaram finos argilosos, classificados como areia laterítica pela classificação MCT expedita.

Quanto ao índice  $c'$ , que traduz o comportamento coloidal do solo, todos os solos apresentaram valores baixos (menor ou igual a 1,6), caracterizado como solos texturalmente arenosos.

A classificação expedita corrobora a análise granulométrica sem defloculante, identificando um solo arenoso de textura arenosa.

#### 4.2.3- CURVAS CARACTERÍSTICAS (SUCCÃO)

Os solos localizados em regiões tropicais caracterizam-se por espessos mantos na condição não saturada. Isso torna os estudos realizados para a compreensão do comportamento hidráulico e mecânico desses solos mais complexos. Para um melhor entendimento do comportamento dos solos estudados, determinaram-se as curvas características de retenção de água (Figura 4.4).

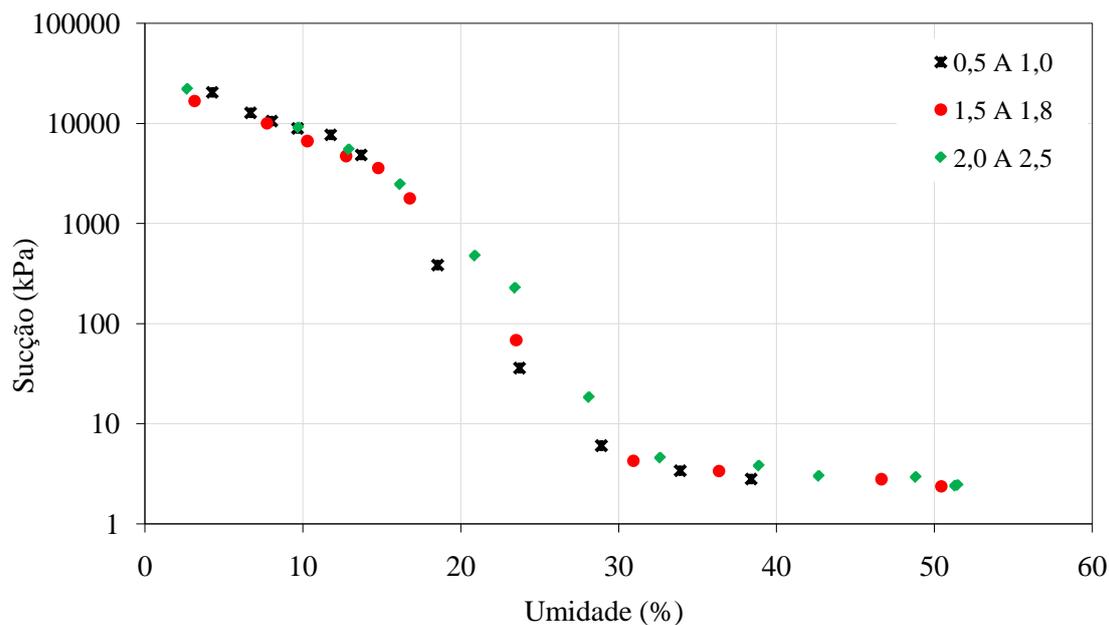


Figura 4.4 – Curvas características: umidade versus sucção.

As curvas características têm sua forma atrelada ao tamanho e distribuição dos poros, ou seja, ao arranjo estrutural. O potencial de retenção de água depende ainda da natureza mineralógica e da superfície específica das partículas que compõem o solo.

De acordo com Camapum de Carvalho e Leroueil (2000), em se tratando de solos tropicais, o intemperismo e a acidez são responsáveis pela agregação de partículas cimentadas ou não por óxidos e/ou hidróxidos de alumínio e/ou ferro. Estas agregações por sua vez se ligam a outras, seja por estes cimentos, seja por pontes de argila, dando origem à distribuição bimodal de poros.

Os resultados apresentados para os trechos submetidos a esse ensaio mostram que a curvas características de sucção em função do teor de umidade se deslocam ligeiramente da esquerda para a direita à medida que se aprofunda no perfil de solo. Esse deslocamento se deve principalmente a variações nos teores de macroporos. Normalmente, nesses casos, o volume de microporos tende a se manter aproximadamente constante. Farias *et. al* (2011) mostra que a compactação destes solos não lhes afeta a microporosidade. Isso leva a crer que a ação dos ciclos de molhagem e secagem afetam pouco essa característica dos solos regionais profundamente intemperizados.

Os solos com distribuição bimodal de poros apresentam dois pontos de entrada de ar na curva característica de retenção de água, sendo o primeiro referente à entrada de ar nos macroporos, para pequenos valores de sucção, e o segundo diz respeito à entrada de ar nos microporos, para valores de sucção mais elevados. Nos solos tropicais, os macroporos ocorrem inter agregados, enquanto os microporos estão intra agregados, os quais, muitas vezes, podem apresentar volume total maior que o dos macroporos (Cardoso, 2002). Como esses macroporos encontram-se distribuídos na matriz do agregado, eles perdem em importância nos fatores definidos pelos comportamentos hidráulicos e mecânico do solo, afetando de modo mais incisivo apenas a deformabilidade e a resistência dos próprios agregados.

Segundo Aubertinet *et al.* (1998) apud Guimarães (2002), espera-se que o ponto de entrada de ar varie entre 0,2 kPa a 1 kPa em areias grossas, 1 kPa a 3,5 kPa em areias médias, 3,5 kPa a 7,5 kPa em areias finas, 7 kPa a 25 kPa em siltes e mais de 25 kPa para as argilas.

Para os solos tropicais profundamente intemperizados típicos da região, a entrada de ar dos macroporos se situa entre 5 e 10 kPa e a dos microporos entre 500 e 10.000 kPa (Guimarães, 2002).

Conforme Camapum de Carvalho *et al.* (2002) e Guimarães (2002), para esse perfil de solo se teria de 0,0 a 3,0 m o predomínio marcante de microporos no interior dos agregados e macroporos entre eles, a partir dessa profundidade a importância dos macroporos diminuiria até praticamente desaparecer a partir do oitavo metro. Para 9,0 e 10,0m, a distribuição de poros tenderia a ser mais bem graduada desaparecendo assim o aspecto marcante da bimodalidade.

#### **4.2.4- PERMEABILIDADE**

A Figura 4.5 apresenta a comparação entre as permeabilidades determinadas *in situ* em furos de sondagem e em laboratório usando-se permeâmetro a carga constante. Cabe destacar que as permeabilidades encontradas em laboratório se referem à permeabilidade horizontal ( $k_h$ ) (nos trechos 0,0m a 0,5m e 1,0 a 1,5m) e à permeabilidade vertical ( $k_v$ ), no trecho de 1,5m a 2,0m.

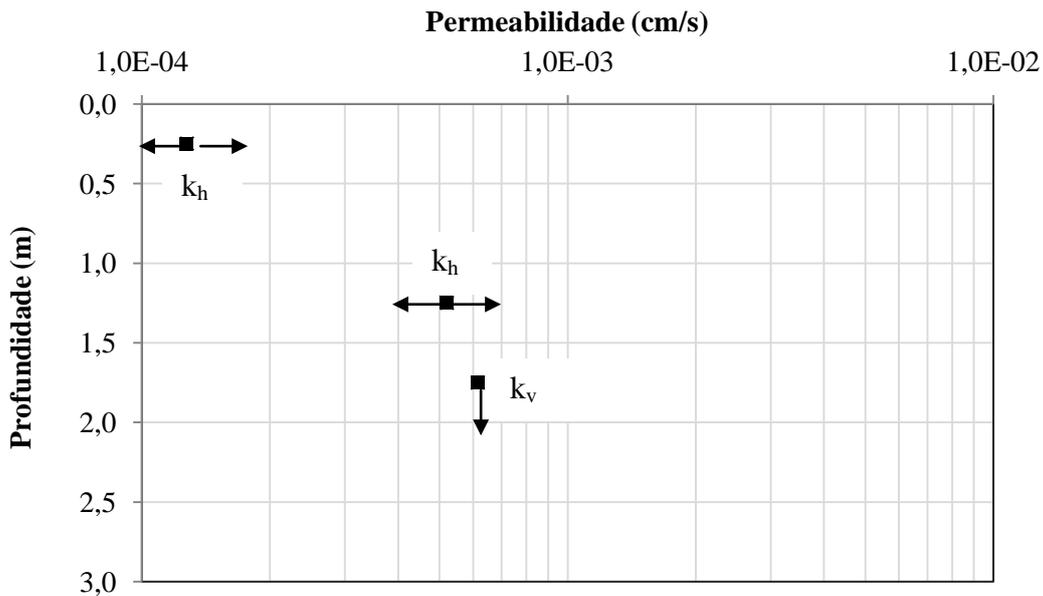


Figura 4.5 – Permeabilidade horizontal e vertical.

De acordo com Nogami&Villibor (1995), a permeabilidade dos solos analisados nesta pesquisa, pode variar da seguinte forma:

- Os solos do tipo LA, nesta pesquisa os provenientes das profundidades 1,0m, 1,5m, 2,0m e 2,5m, apresentam um coeficiente de permeabilidade de baixo a médio, com valores variando de  $10^{-3}$  a  $10^{-7}$  cm/s, os quais, segundo a Epa (1987), classificam os solos como semipermeáveis a impermeáveis.
- Os solos LA' e LG', nesta pesquisa o de profundidade de 0,0m a 0,5m, classificam-se como solos de baixa permeabilidade, variando numa faixa de  $10^{-6}$  a  $10^{-7}$  cm/s.

Na classificação expedita apresentada, os solos foram classificados como LA e LA'-LG' e, nas amostras analisadas, determinaram-se permeabilidades em campo variando entre  $10^{-2}$  e  $10^{-3}$  cm/s e em laboratório, como se verá a seguir, entre  $10^{-3}$  e  $10^{-4}$  cm/s, ou seja, todas as amostras ensaiadas teriam com características de LA, segundo a classificação de Nogami&Villibor (1995). Portanto, para os solos regionais estudados nesta pesquisa os valores de permeabilidade estimados a partir desta proposta não avaliam bem a permeabilidade do perfil de solo.

#### 4.2.5- ENSAIO DE FURO DE AGULHA (*PINHOLE TEST*)

Os solos profundamente intemperizados são, pela sua natureza químico-mineralógica, não dispersivos, não havendo, portanto, que se discutir esta hipótese aqui. Pode-se, no entanto, com base nos ensaios granulométricos levantar a hipótese de desagregabilidade, pouco provável no caso de fluxo de água como, de modo geral, ocorre nos sistemas de infiltração. A Figura 4.6 apresenta os resultados das vazões determinadas no ensaio de *pinhole test*. As vazões de carga de ambas as amostras apresentaram até a profundidade de 1,5m pequena variação ao se comparar as vazões obtidas durante o carregamento com as oriundas do descarregamento, o que caracteriza um solo pouco susceptível ao fenômeno da esqueletização por efeito do fluxo. No entanto, para a camada compreendida entre 1,5 m e 2,0 m aumenta a diferença entre os caminhos de carregamento e de descarregamento gerando certa preocupação com o fenômeno da esqueletização. É provável, no entanto, que tal efeito tenha surgido nas amostras por haver ultrapassado certa carga crítica sugerida na Figura 4.6 pela linha tracejada. Com isso, torna-se conveniente a realização de estudos complementares com o intuito de verificar essa hipótese e também se o limite crítico se daria em termos de carga hidráulica ou gradiente hidráulico.

Comparando-se os resultados obtidos com um solo arenoso, observou-se que, apesar do solo estudado ser, quando desagregado, argiloso (sedimentação com a utilização de defloculante), ele apresenta maiores vazões que o solo identificado como arenoso, fato que pode ser atribuído à característica macro-porosa dos solos profundamente intemperizados da região centro-oeste.

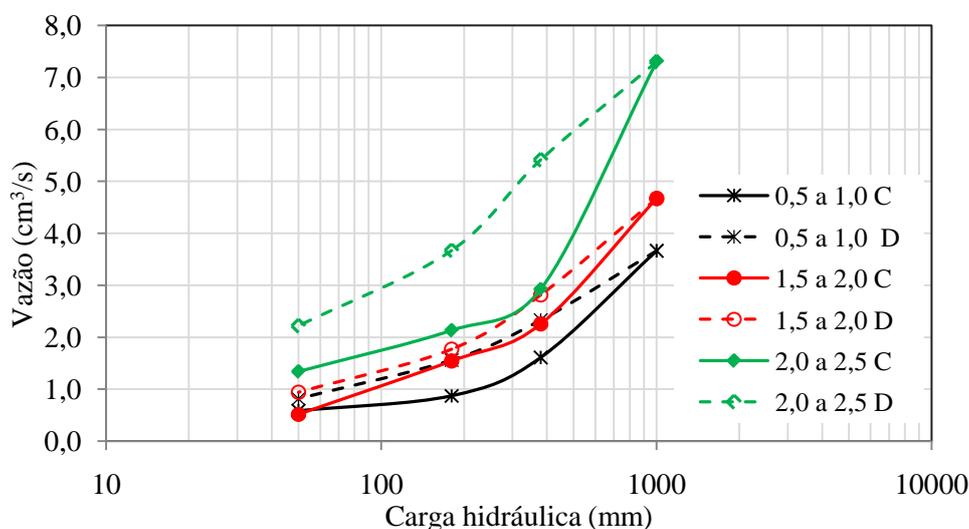


Figura 4.6 – Gráfico do *Pinhole test*.

Observa-se ainda um gradativo aumento de vazão com a profundidade tanto no carregamento como no descarregamento, o que corrobora os ensaios físicos quanto ao crescimento da porosidade com a profundidade.

#### 4.2.6- ADENSAMENTO OEDOMÉTRICO

A realização dos ensaios oedométricos teve por objetivo principal analisar a colapsibilidade do solo por inundação (Figura 4.7). Realizaram-se ensaios com e sem inundação, buscando determinar o potencial de colapso tensões verticais compatíveis com o enchimento das trincheiras utilizando-se a Equação 1.

$$CP = \frac{\Delta e}{1 + e_o} \quad (4.1)$$

Onde:

CP = Potencial de colapso;

$\Delta e$  = Variação do índice de vazios na inundação;

$e_o$  = Índice de vazios inicial (antes da inundação).

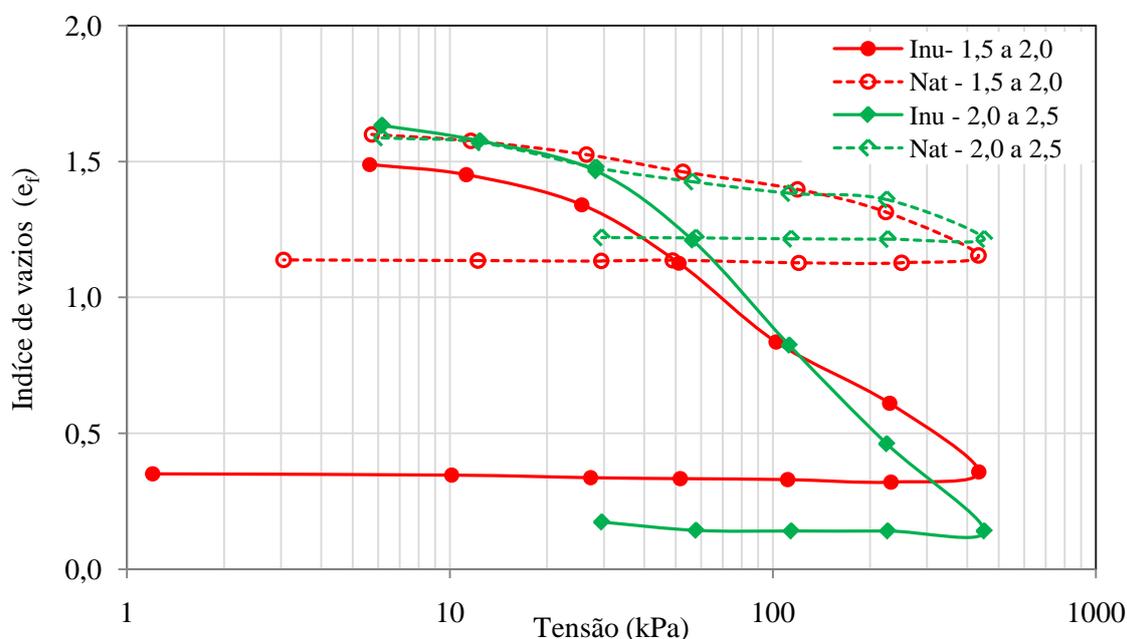


Figura 4.7 – Curvas de Compressibilidade Natural e Inundado nos trechos: 1,5m a 2,0m e 2,0 a 2,5m.

Esta observação torna-se necessária tendo em vista que, como condicionantes da colapsibilidade, destacam-se o acréscimo de carga e o aumento de umidade, situação totalmente favorecida nos sistemas de drenagem e de infiltração convencionais. Caracteriza-se por elevada colapsibilidade, conforme Figura 4.8. Esta constatação mostra a necessidade de se preservar ou mesmo reduzir as tensões atuantes no solo por efeito do próprio enchimento da trincheira.

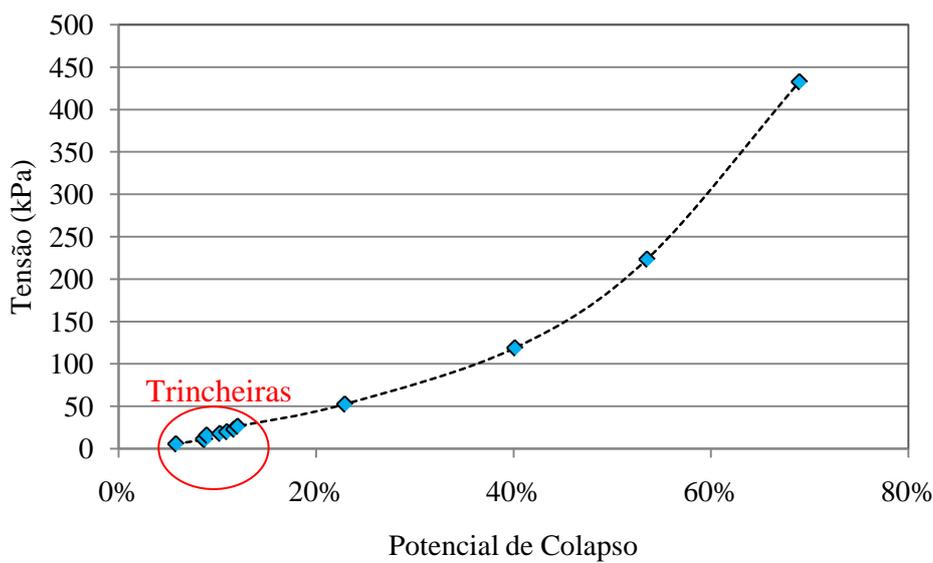


Figura 4.8 – Potencial de colapso do solo.

Efetuarão-se os ensaios nas profundidades apresentadas em função do fato de que as células apresentam maiores sobrecargas no fundo, devido ao enchimento e ao armazenamento de água no seu interior. Estes valores tornam-se essenciais para escolha do material de enchimento das trincheiras de infiltração.

#### 4.2.7- PERMEABILIDADE NO ADENSAMENTO (CÉLULA ROWE)

Com objetivo de quantificar a influencia do gradiente hidráulico oriundo da sucção atuante no solo, realizou-se o ensaio de adensamento controlado utilizando a célula Rowe, pois ela permite que, além da aplicação da carga axial, seja possível a determinação da permeabilidade variando a pressão de água inserida na amostra. Isso possibilita o estudo de diversos gradientes. A técnica corresponderia a translação de eixos que se passa para pressão neutra negativa.

Visando simular o comportamento da permeabilidade à água nas paredes das trincheiras utilizou-se a amostra coletada no trecho entre 1,0m e 1,5m de profundidade. Nessa amostra,

realizaram-se os ensaios de adensamento de forma que a carga axial aplicada desce no sentido horizontal. Após a estabilização das deformações em cada estágio de carregamento no ensaio de adensamento, fez-se a inserção de água sobre diferentes pressões, procedendo-se o ensaio de permeabilidade.

Para uma mesma carga axial, aplicaram-se seis etapas de gradientes hidráulicos (entre 15 kPa e 400 kPa), determinando valores decrescentes de permeabilidade. Ou seja, quanto maior o gradiente, menor a permeabilidade horizontal e vertical, como apresentado nas Figuras 4.9 e 4.11, respectivamente.

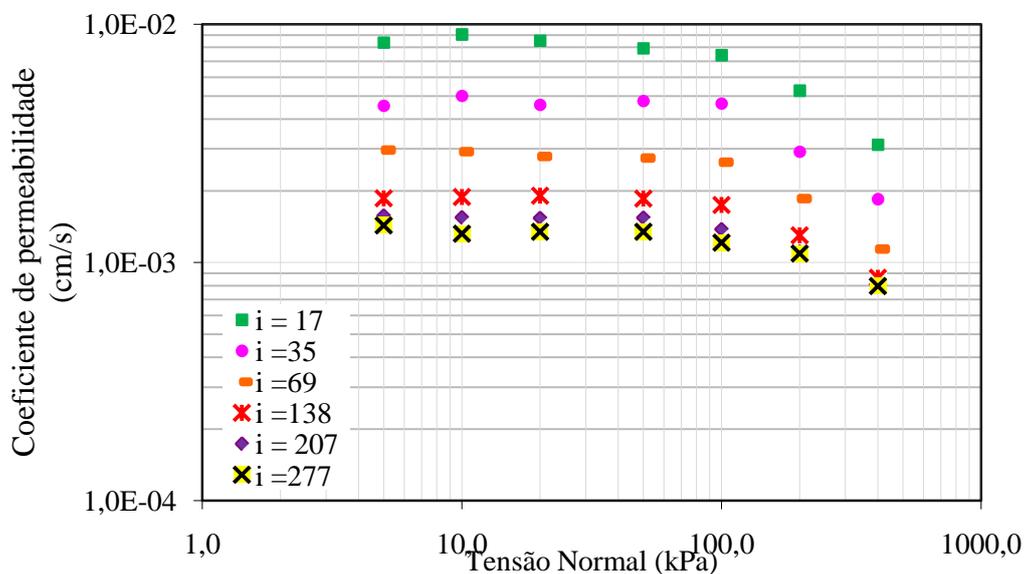


Figura 4.9 – Coeficiente de permeabilidade *versus* tensão normal, na amostra de 1,0 a 1,5m de profundidade.

Conforme eram aplicadas as cargas de adensamento, as permeabilidades diminuam sensivelmente. Tal fato é de se esperar, pois o adensamento diminui a macroporosidade por onde se dá a passagem da água. Após a aplicação de 100 kPa no adensamento, a diferença da permeabilidade tornou-se mais representativa, visto que deslocou a curva de 200 kPa em torno de 20% e a de 400 kPa em torno de 50%, do comportamento das demais curvas. Com esta observação, pode-se considerar que o solo, após adensamento de uma carga 100 kPa, torna-se menos permeável horizontalmente (Figura 4.10).

Com o intuito de se verificar o comportamento da permeabilidade após o adensamento no fundo da trincheira, realizaram-se ensaios com fluxo no sentido vertical nas amostras coletadas no trecho entre 1,5m a 2,0m de profundidade. Executaram-se os ensaios seguindo

procedimento semelhante ao adotado no ensaio da amostra anterior, alterando-se apenas as condições de moldagem quanto à direção a ser adotada no carregamento e no fluxo.

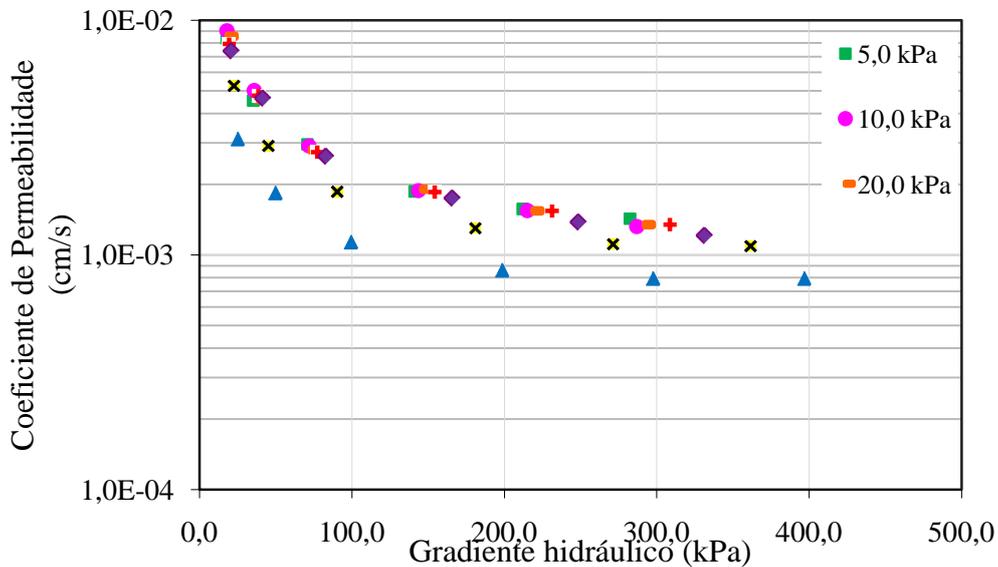


Figura 4.10 – Variação da permeabilidade horizontal *versus* gradiente, no trecho de 1,0 a 1,5m.

Na Figura 4.11, observa-se que as permeabilidades mostraram um comportamento sensivelmente decrescente nas primeiras cargas (até a carga axial de 50 kPa). A partir desta carga, as leituras de permeabilidades apresentaram-se muito próximas, quase constantes, até uma carga de adensamento próxima de 400 kPa.

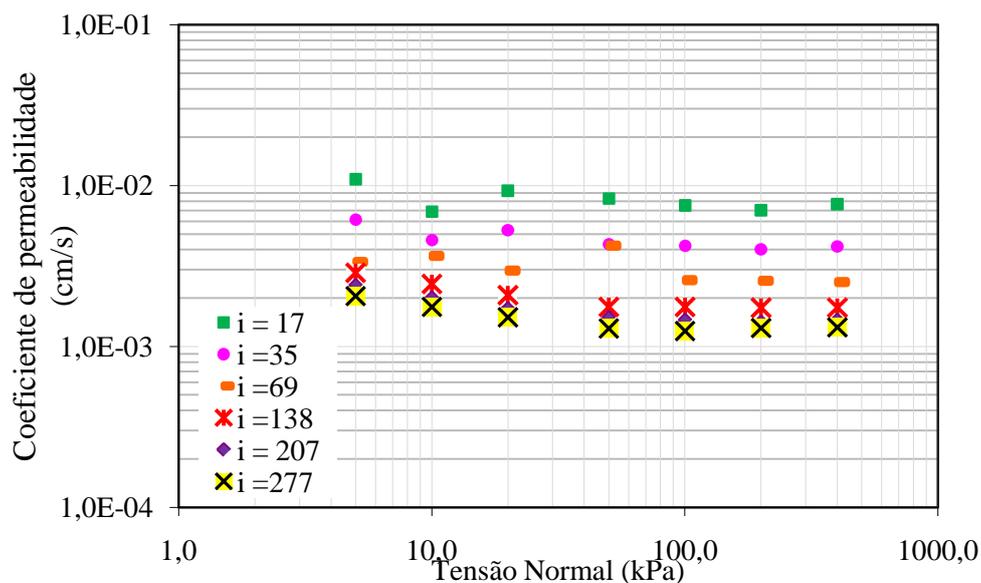


Figura 4.11 – Coeficiente de permeabilidade *versus* tensão normal, na amostra de 1,5m a 2,0m de profundidade.

Comparando os resultados, observa-se que estes confirmam os ensaios de permeabilidade realizados no laboratório e apresentados no item 4.2.4, nos quais se obtiveram valores aproximados de  $10^{-3}$  cm/s, tanto no sentido vertical quanto no horizontal.

Embora fosse esperado que o gradiente hidráulico não afetasse a permeabilidade determinada para o solo, verifica-se nas Figuras 4.8 e 4.9 que ele a afetou. Da comparação entre as Figuras 4.9 e 4.11, observa-se que o modo como se deu a variação da permeabilidade com o gradiente hidráulico ao se variar a tensão aplicada foi distinto nos dois casos. Na Figura 4.9, obtida com o fluxo e solitação horizontal da amostra, a permeabilidade apresenta pequenas variações até a tensão normal de 100 kPa, tensão a partir da qual a permeabilidade passa a apresentar grandes variações com o aumento da tensão aplicada.

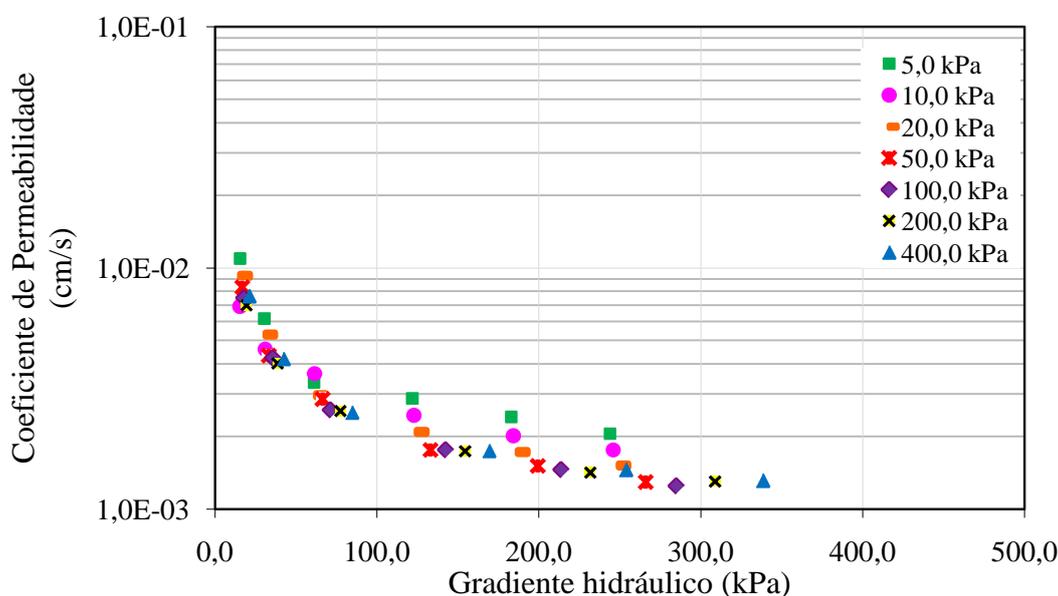


Figura 4.12 – Variação da permeabilidade vertical *versus* gradiente, no trecho de 1,5 a 2,0m de profundidade.

Já na Figura 4.12, obtida com o fluxo e solitação vertical da amostra, a permeabilidade apresenta grandes variações até a tensão normal de 50 kPa, a partir da qual a permeabilidade passa a apresentar pequenas variações com o aumento da tensão aplicada ao se aumentar o gradiente hidráulico. Cabe destacar que as curvas de adensamento normalizadas em relação aos respectivos índices de vazios iniciais se sobrepõem para as duas amostras ensaiadas (Figura 4.13). Resta então a hipótese de que a microporosidade presentes nos agregados se comunique de forma diferente com os macroporos. No primeiro caso as grandes variações de

permeabilidade se dariam após o início da quebra estrutural do solo e no segundo estas se reduziriam exatamente quando deu-se a quebra.

Plotando-se a permeabilidade horizontal em função da vertical para valores semelhantes de gradiente e variando-se a tensão aplicada (Figura 4.14), percebe-se exatamente o fenômeno relativo descrito. Surge dessas análises a necessidade de estudos complementares para melhor entender o fenômeno do fluxo nos solos profundamente intemperizados.

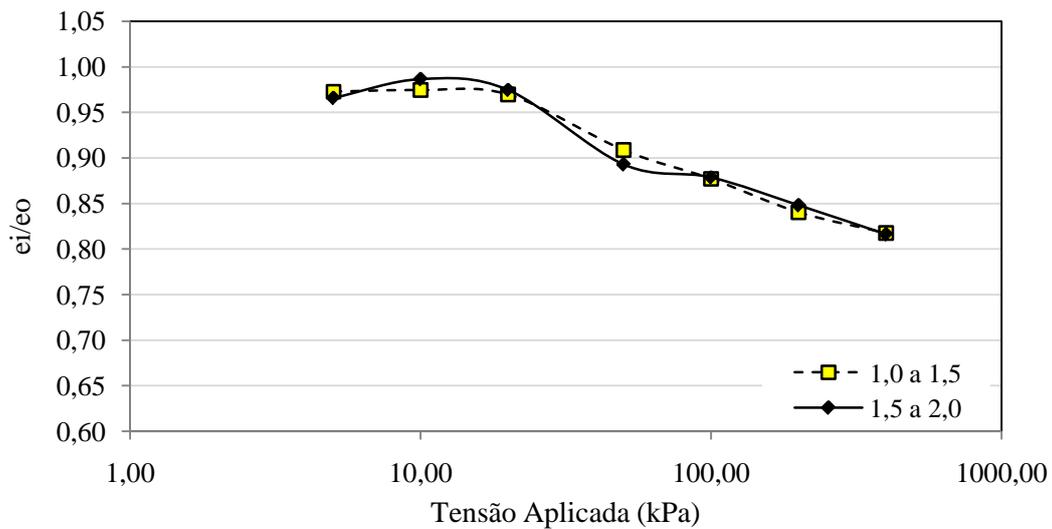


Figura 4.13– Curvas de adensamento normalizadas  $e_i/e_o$ .

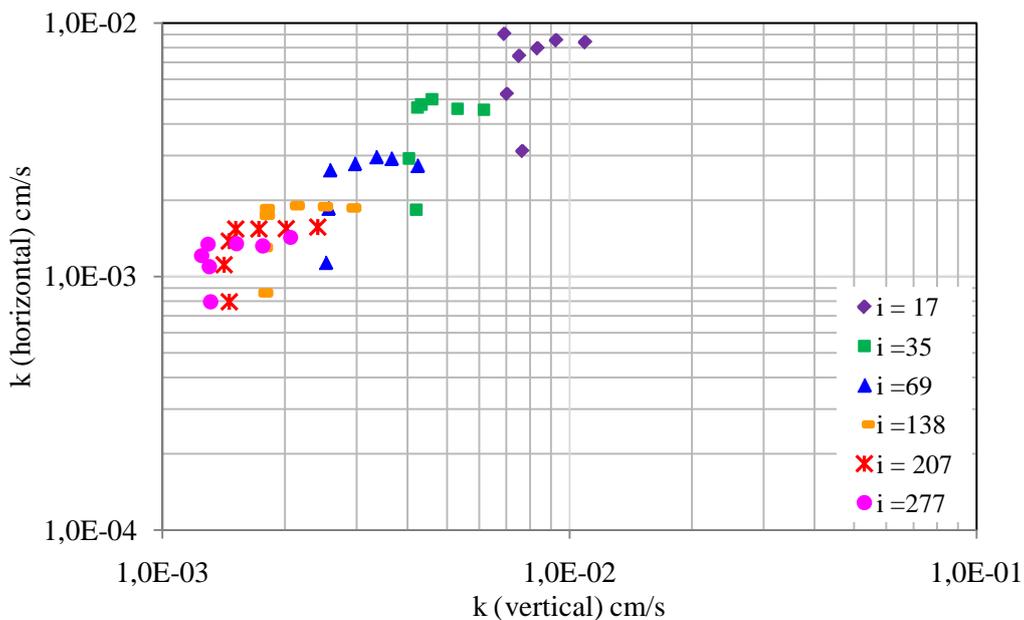


Figura 4.14– Permeabilidade horizontal *versus* permeabilidade vertical.

### 4.3- DADOS DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA

Com o objetivo de monitorar a precipitação, a temperatura do ar e do solo e a umidade superficial do solo, foram realizadas leituras de janeiro de 2010 a novembro de 2011. Os dados eram armazenados por períodos mínimos de 30 dias no *datalogger* da estação.

#### 4.3.1- PRECIPITAÇÃO

Conforme a Figura 4.15, os dados de precipitação apresentam-se compatíveis com o comportamento de chuva da região do Distrito Federal, com meses chuvosos de outubro a abril e secos de maio a setembro.

Como precipitações máximas, obtiveram-se valores próximos a 70mm no mês de abril e sem ocorrência de chuvas nos meses de julho e agosto.

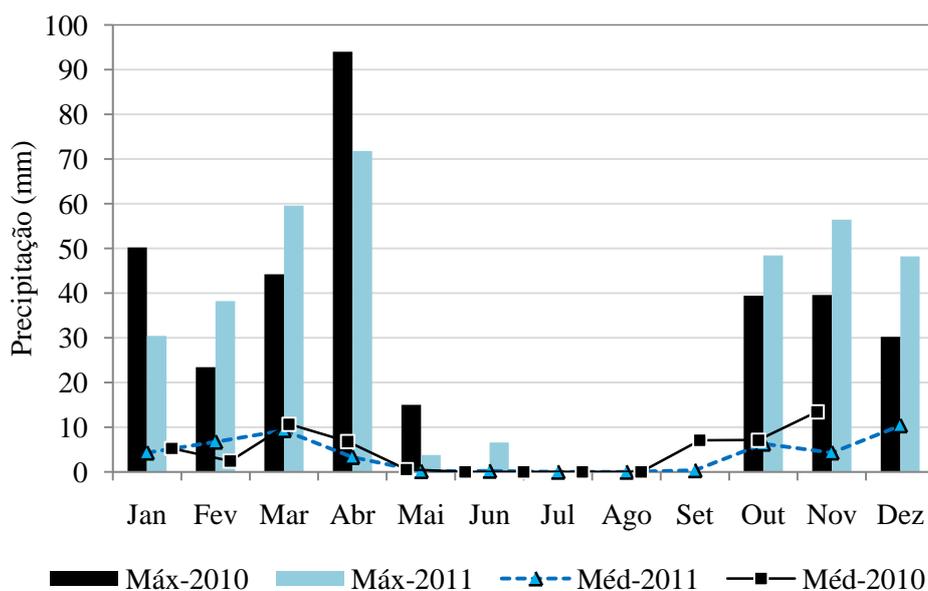


Figura 4.15 – Precipitações máximas e médias diárias, dos anos 2010 e 2011.

#### 4.3.2- UMIDADE DO SOLO

A umidade do solo destaca-se, nesta pesquisa, como um dos coeficientes mais importantes a se considerar no estudo da infiltração, logo seu monitoramento local torna-se fundamental nas análises posteriores.

Pode-se observar que o comportamento da umidade superficial corrobora os dados de precipitação, ou seja, nos meses de maiores chuvas, o solo apresenta maior umidade (de outubro a abril) e, nos meses de menor precipitação (de maio a setembro), menores valores de umidade (Figura 4.16).

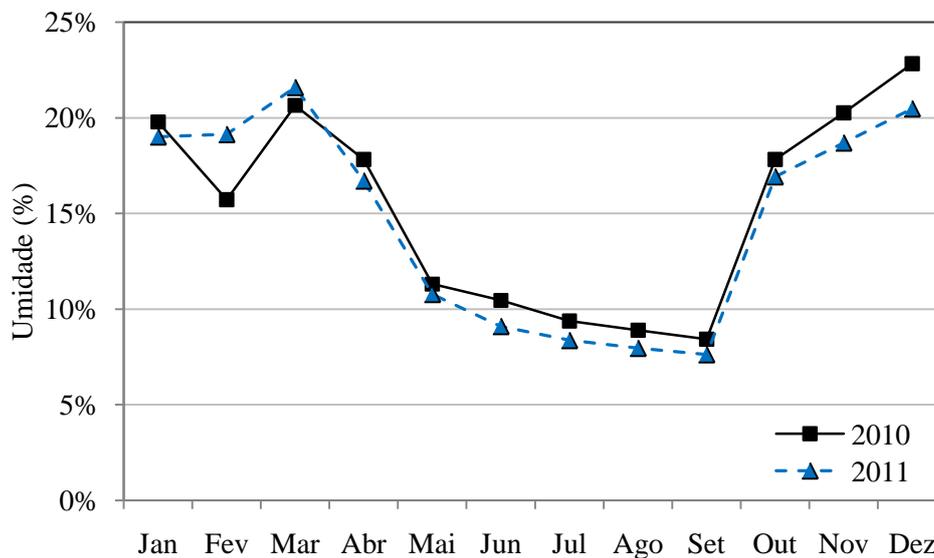


Figura 4.16 – Umidade do solo superficial, 2010 e 2011.

### 4.3.3- TEMPERATURA DO SOLO

As temperaturas do solo foram determinadas a partir de sensores de temperatura posicionados em 3 profundidades: 5, 10 e 15 cm da superfície, esses sensores estão diretamente ligados a estação meteorológica. A Figura 4.17 apresenta os resultados medidos no ano de 2010. Em que se destacam temperaturas máximas de até 25°C e mínimas em torno de 18°C. A Figura 4.18 apresenta os resultados mensais medidos no ano de 2011. As temperaturas máximas em torno de 26°C e as mínimas em torno de 19°C.

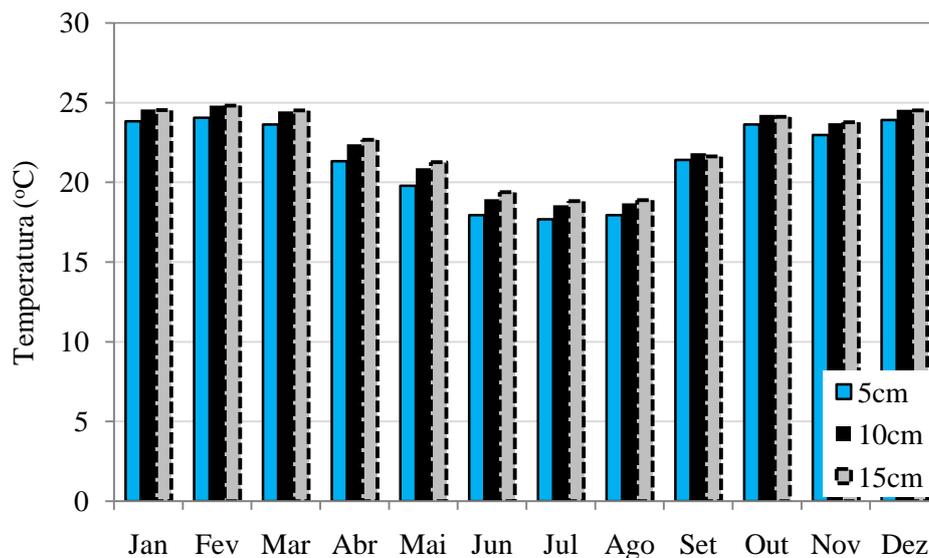


Figura 4.17 - Temperaturas médias mensais do solo superficial, ano 2010.

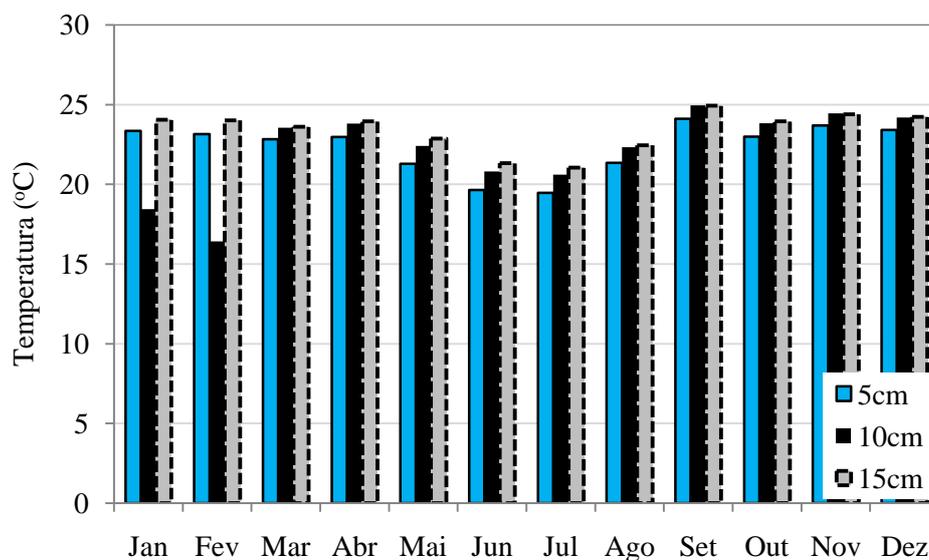


Figura 4.18 – Temperaturas médias mensais do solo superficial, ano 2011.

O sensor posicionado a 5cm da superfície destaca-se com menores temperaturas, por estar mais próximo à superfície e por isso, com maior facilidade de troca com a temperatura do ar.

Os valores de temperatura determinam uma função de distribuição decrescente de janeiro a agosto e crescente de agosto a dezembro. Observa-se, nestes dados, certa semelhança com o comportamento dos dados de precipitação e de umidade de solo (Figura 4.19).

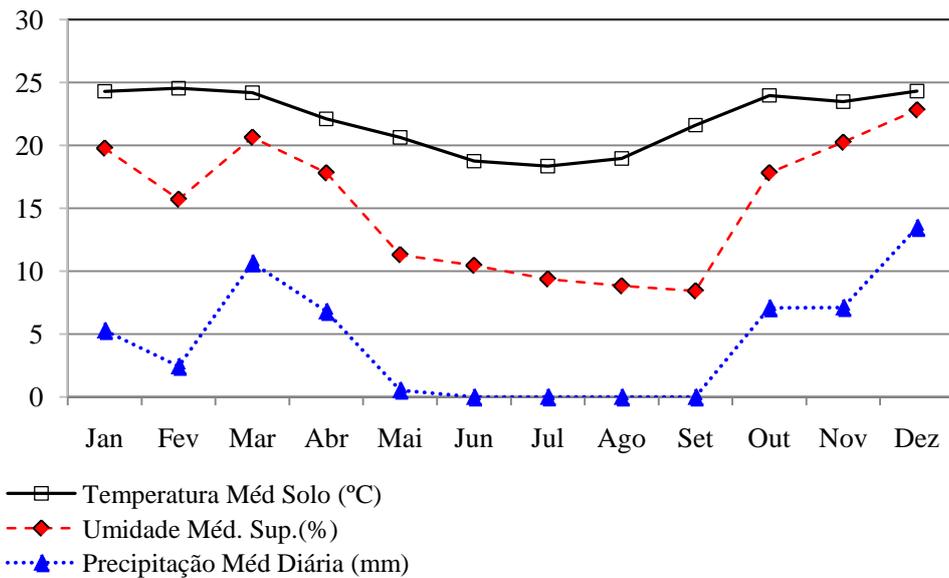


Figura 4.19 – Precipitação, umidade e temperatura do solo, ano 2010.

#### 4.3.4- UMIDADE RELATIVA E TEMPERATURA DO AR

Os valores de umidade relativa e de temperatura do ar compõem os dados que caracterizam a região centro-oeste do Brasil, que apresenta o cerrado como vegetação predominante e clima bem definido em chuvoso a seco.

Na Figura 4.20, observam-se valores médios o mínimo em torno de 40% nos meses secos e máximo em torno de 80% nos meses mais chuvosos.

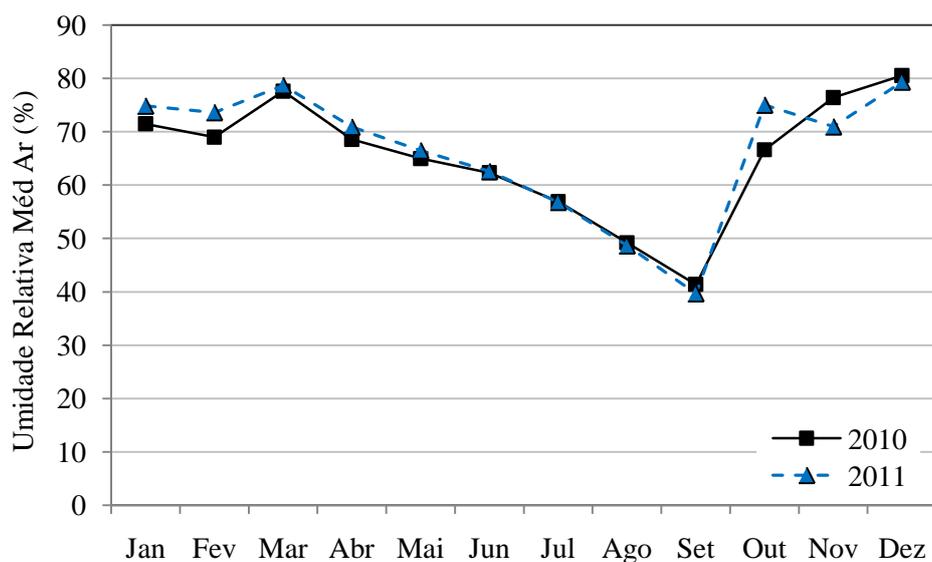


Figura 4.20 – Umidade relativa média do ar, ano 2010 e 2011.

Na Figura 4.21, observam-se os intervalos que delimitam as temperaturas médias do ano.

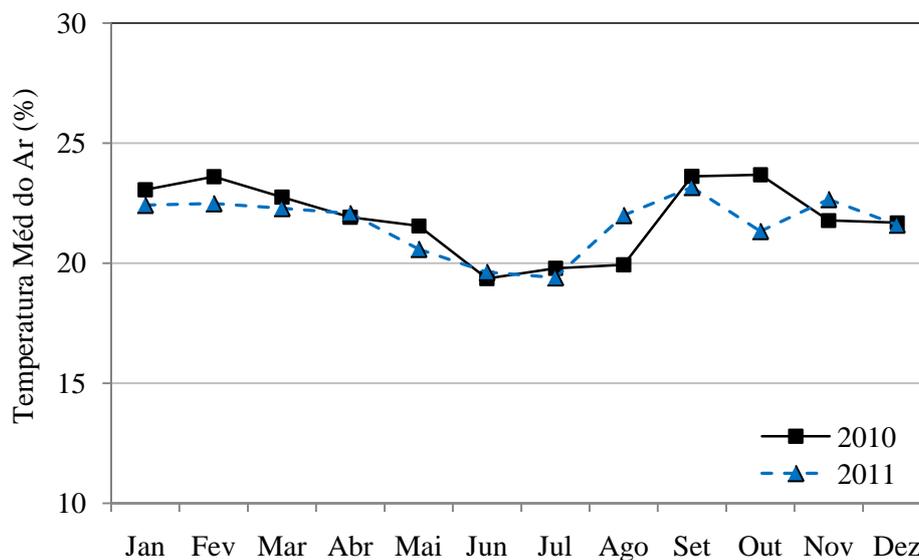


Figura 4.21 – Temperatura média do ar, ano 2010 e 2011.

Como característica da região, pode-se citar baixas umidades do ar nos meses de seca, podendo atingir 10% nos horários mais quentes do dia, e menores temperaturas de junho a setembro.

#### 4.3.5- DADOS ACUMULADOS DE PRECIPITAÇÃO

Em valores acumulados, pode-se representar a precipitação mensal e determinar quantos milímetros de chuva foram acumulados do início do mês até o dia do ensaio (Figura 4.22). Cabe lembrar que os valores de precipitação determinados na estação meteorológica estão referenciando tanto os ensaios de infiltração em furo de sondagem quanto os ensaios de enchimento realizados nas trincheiras.

Observa-se que o mês de dezembro de 2010 apresentou um maior acumulado de precipitação em torno de 320mm, seguido pelos meses de novembro/2010, outubro/2010, fevereiro/2011 e janeiro/2011. Já os meses de agosto/2010, setembro/2010 e julho/2011 não apresentaram ocorrências de precipitação.

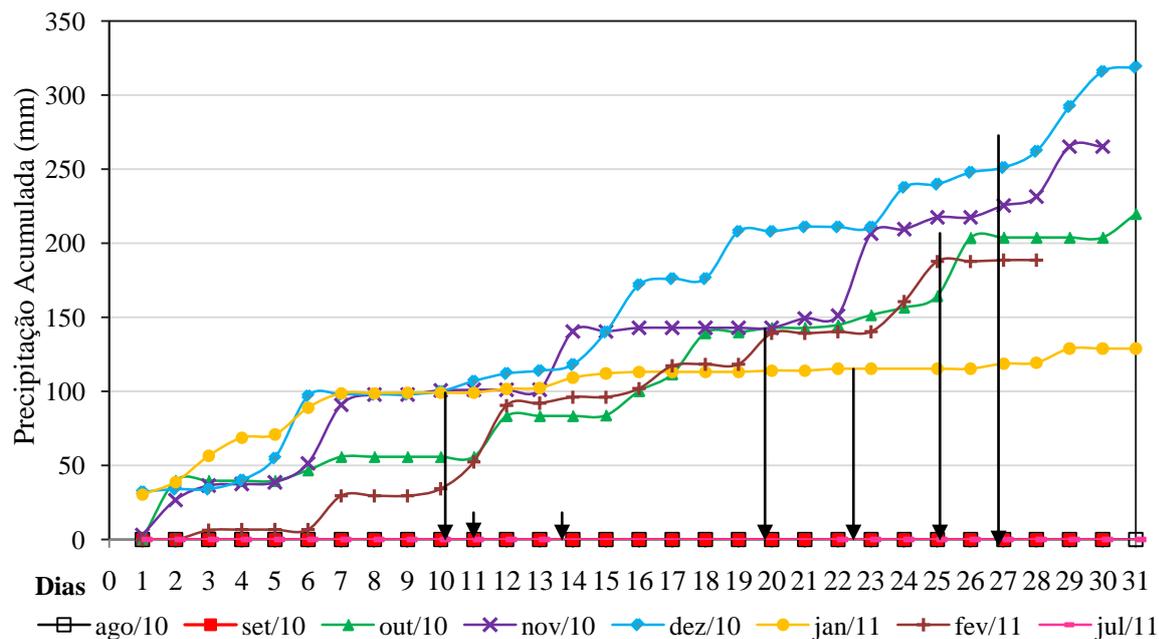


Figura 4.22 – Precipitação acumulada nos meses de ensaio.

#### 4.4- ENSAIO DE PERMEABILIDADE EM FURO DE SONDAÇÃO COM MONITORAMENTO DO PERFIL DE UMIDADE

##### 4.4.1- ETAPAS DOS ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO

Embora este item traga em seu conteúdo, aspectos meteorológicos, localizá-lo aqui ajudará entender melhor os resultados obtidos nos ensaios de infiltração. O perfil de umidade foi determinado a partir do monitoramento do solo em que foram realizados ensaios de infiltração. Esses ensaios foram repetidos por oito etapas em diferentes épocas do ano. Em cada etapa, realizava-se um ensaio de infiltração no furo principal até a profundidade de 2m e retiravam-se amostras antes e após os ensaios. De 64 furos de inspeção de umidade, coletou-se um total de 448 amostras, retiradas a cada 0,50 m a partir da superfície, até a profundidade de 3,0m (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 – Permeabilidades medidas por meio de ensaios de infiltração.

Etapas	Data do Ensaio	Furos de Inspeção de Umidade	Permeabilidade de campo (cm/s)
1°	11/08/2010	1A a 4D 1D a 4D	$8 \times 10^{-2}$
2°	14/08/2010	5A a 8A 5D a 8D	$5 \times 10^{-2}$
3°	29/09/2010	9A a 12A 9D a 12D	$3 \times 10^{-2}$
4°	21/10/2010	13A a 16A 13D a 16D	$6 \times 10^{-2}$
5°	27/11/2010	17A a 20A 17D a 20D	$6 \times 10^{-2}$
6°	10/12/2010	21A a 24A 21D a 24D	$5 \times 10^{-2}$
7°	24/01/2011	25A a 28A 25D a 28D	$4 \times 10^{-2}$
8°	21/02/2011	29A a 32A 29D a 32D	$3 \times 10^{-2}$

#### 4.4.1.1- PRIMEIRA ETAPA DE ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO

A primeira etapa compreendeu o primeiro ensaio de infiltração e oito furos de inspeção de umidade. O ensaio foi realizado no dia 11 de agosto de 2010, referenciado como ensaio 1. Analisando-se os dados de precipitação obtidos na estação meteorológica nos últimos meses que antecederam o ensaio, houve um extenso período de estiagem de chuva que se iniciou em 25/05/2010, com precipitação acumulada de 15mm. Após este evento apenas no dia 30/07/2010 precipitou 0,2mm. Conforme mostra a Figura 4.21, na data do ensaio, não houve chuva, a temperatura máxima do ar alcançou 28°C, a umidade relativa mínima do ar chegou a 22%, verificou-se um teor de 9% de umidade média superficial do solo e; 18,3°C de temperatura média superficial do solo quando do início do ensaio.

#### 4.4.1.2- SEGUNDA ETAPA DE ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO

A segunda etapa compreendeu o segundo ensaio de infiltração e oito furos de inspeção de umidade. O ensaio foi realizado no dia 14 de agosto de 2010 (referenciado, portanto, como ensaio 2). Conforme a Figura 4.23, na data do ensaio não houve chuva, a temperatura máxima do ar alcançou os 30°C, a temperatura média superficial do solo situou-se em torno de 18,5°C,

a umidade relativa mínima do ar chegou a 19% e verificou-se um valor de 9% para a umidade média superficial do solo.

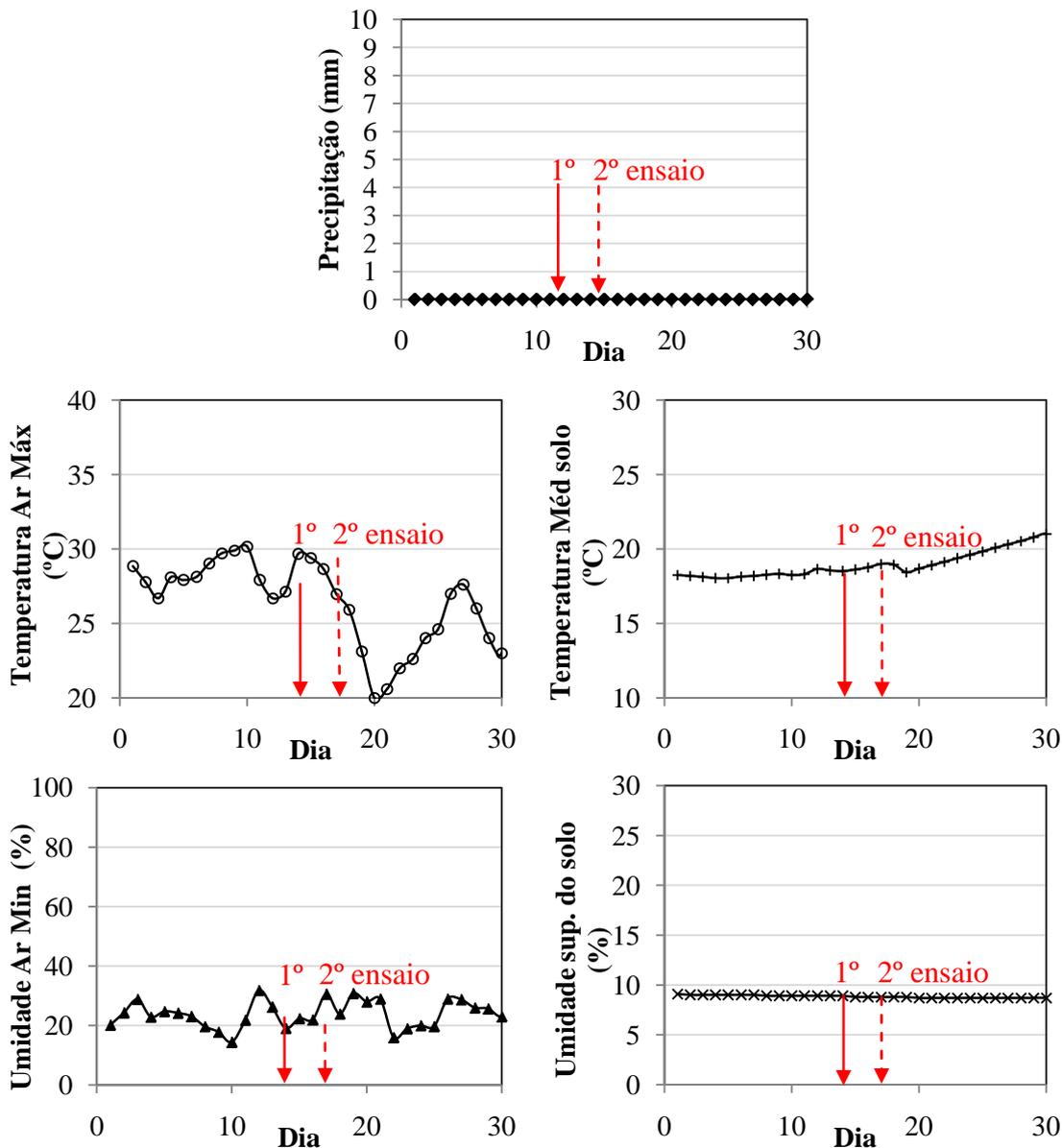


Figura 4.23 – Dados meteorológico do mês de agosto de 2010.

#### 4.4.1.3- TERCEIRA ETAPA DE ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO

A terceira etapa compreendeu o terceiro ensaio de infiltração e oito furos de inspeção de umidade. O ensaio foi realizado no dia 29 de setembro de 2010 (ensaio 3). Conforme a Figura 4.24, verifica-se que, na data do ensaio, não houve chuva, a temperatura máxima do ar alcançou os 28°C, a temperatura média superficial do solo situou-se em torno de 18,3°C, a umidade relativa mínima do ar chegou a 22% e, 9% de umidade média superficial do solo.

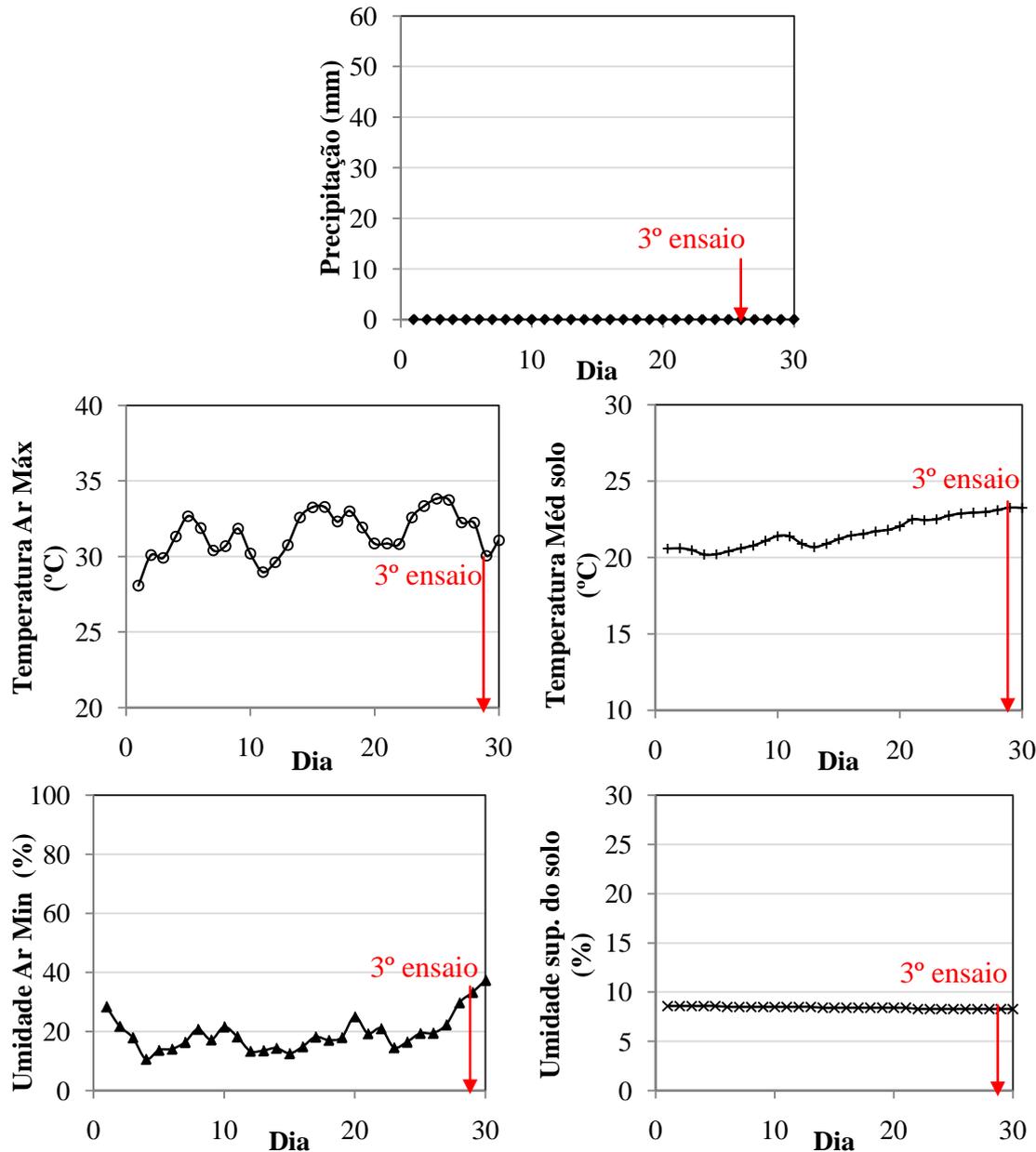


Figura 4.24 – Dados meteorológicos do mês de setembro de 2010.

#### 4.4.1.4- QUARTA ETAPA DE ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO

A quarta etapa compreendeu o quarto ensaio de infiltração e oito furos de inspeção de umidade. O ensaio foi realizado no dia 21 de outubro de 2010, referenciado como ensaio 4. Conforme a Figura 4.25, na data do ensaio não houve chuva. Porém, após 129 dias de estiagem, no dia 02 de outubro de 2010, verificou-se uma precipitação de 39mm, iniciando-se assim o período chuvoso da região. Após este dia, observaram-se outras ocorrências chuvosas, totalizando 143mm de precipitação acumulada no mês até o dia do ensaio e um total 220mm em todo mês de outubro. No dia do ensaio, a temperatura máxima alcançou 32°C, a

temperatura média superficial do solo ficou em torno de 24,2°C, a umidade relativa mínima do ar chegou a 31% e apresentava-se um teor de umidade média superficial do solo de 19%.

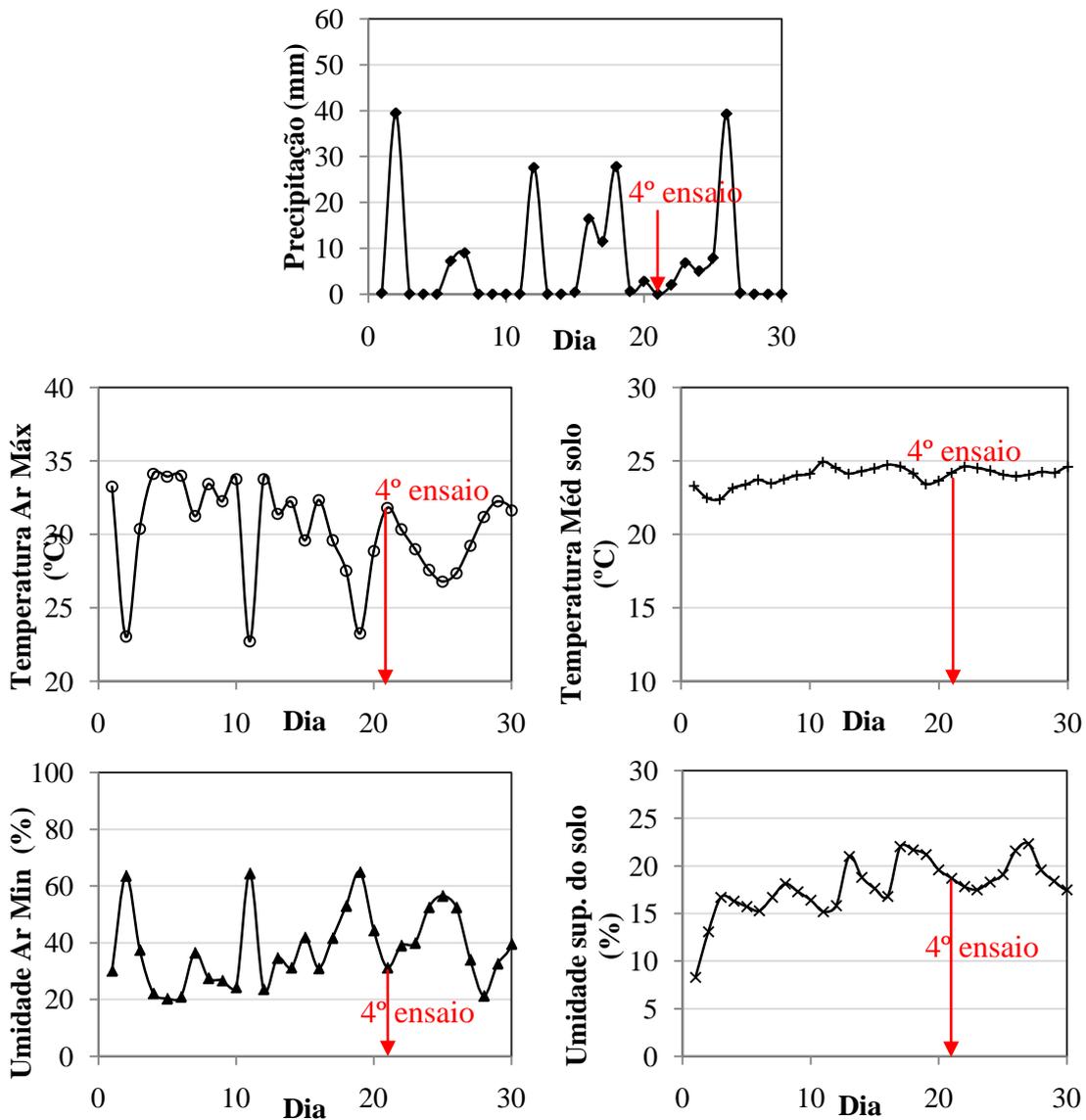


Figura 4.25 – Dados meteorológicos do mês de outubro de 2010.

#### 4.4.1.5- QUINTA ETAPA DE ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO

A quinta etapa compreendeu o quinto ensaio de infiltração e oito furos de inspeção de umidade. O ensaio foi realizado no dia 27 de novembro 2010 (ensaio 5). Conforme a Figura 4.26, na data do ensaio ocorreu uma chuva de 2mm. Contudo, outras ocorrências foram observadas, apresentando-se assim um acumulado de chuvas de 181mm até o dia do ensaio e um total 185mm em todo mês de novembro. No dia do ensaio, a temperatura máxima alcançou 28°C, a temperatura média superficial do solo situou-se em torno de 24,5°C, a

umidade relativa mínima do ar chegou a 51% e apresentava-se um teor de umidade média superficial do solo de 20%.

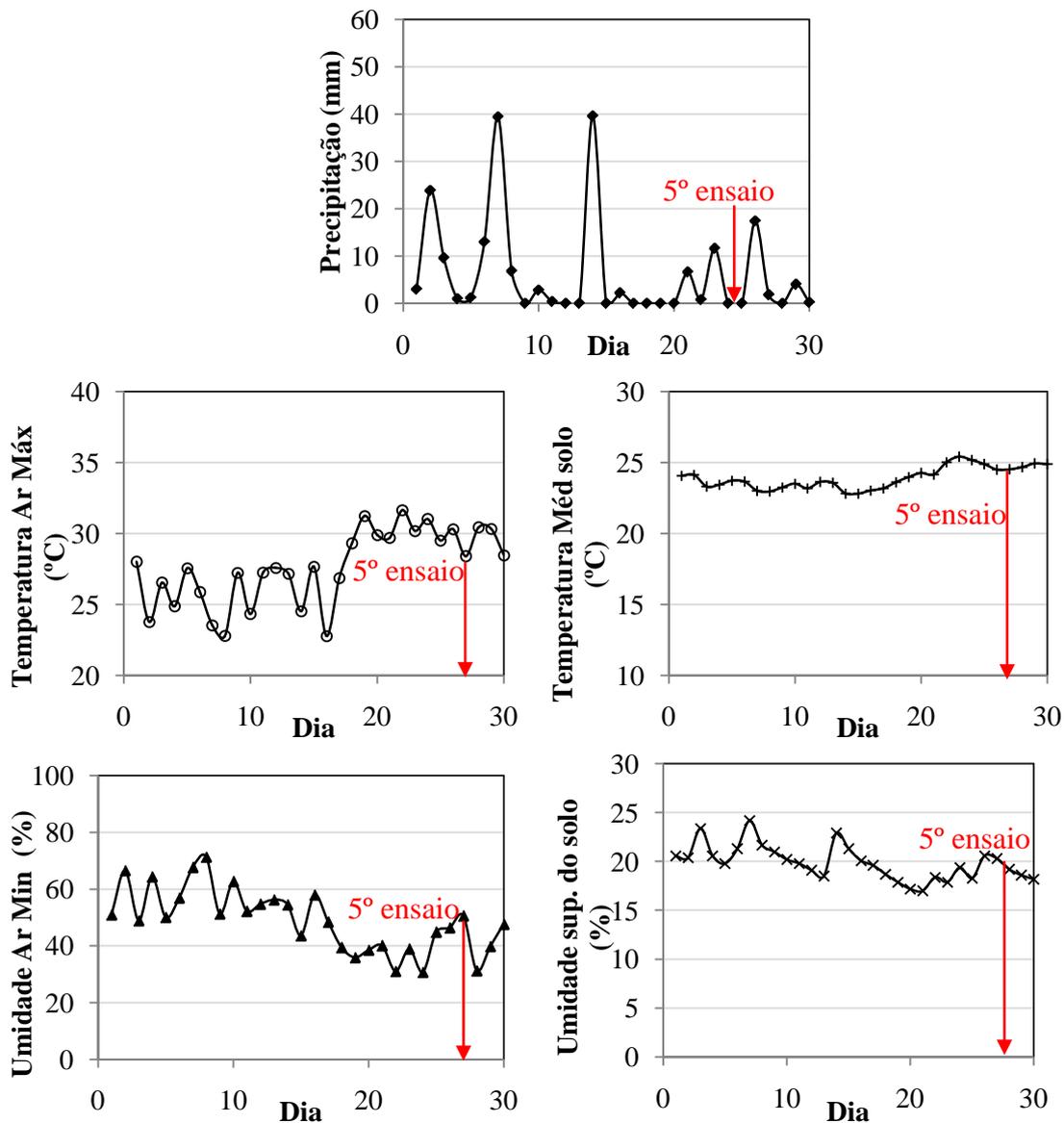


Figura 4.26 -Dados meteorológicos do mês de novembro de 2010.

#### 4.4.1.6- SEXTA ETAPA DE ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO

A sexta etapa compreendeu o sexto ensaio de infiltração e oito furos de inspeção de umidade. O ensaio 6 foi realizado no dia 10 de dezembro 2010 e, conforme a Figura 4.27, na data do ensaio, ocorreu uma chuva de 3mm. Porém, verificaram-se outras ocorrências chuvosas totalizando um acumulado de chuvas de 86mm até o dia do ensaio e um total 358mm em todo mês de dezembro. No dia do ensaio, a temperatura máxima alcançou os 27°C, a temperatura

média superficial do solo ficou em torno de 24,3°C, a umidade relativa mínima do ar chegou a 40% e apresentava-se um valor de 18% de umidade média superficial do solo.

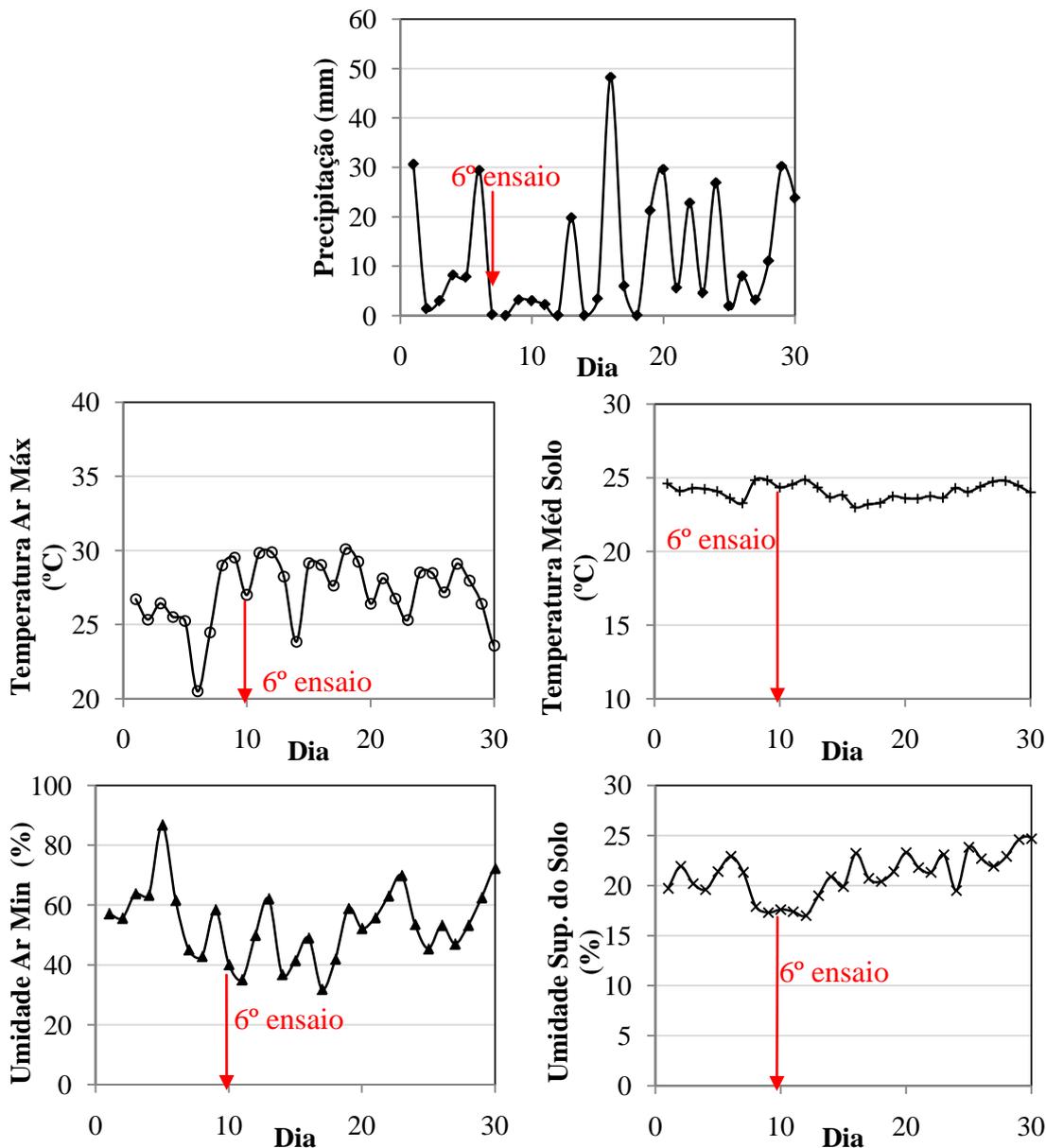


Figura 4.27– Dados meteorológicos do mês de dezembro de 2010.

#### 4.4.1.7- SÉTIMA ETAPA DE ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO

A sétima etapa de ensaios compreendeu o sétimo ensaio de infiltração e oito furos de inspeção de umidade. O ensaio foi realizado no dia 24 de janeiro 2011, referenciado como ensaio 7. Conforme ilustra a Figura 4.28, na data do ensaio, não houve chuva. Entretanto, observou-se um valor acumulado de chuvas de 115mm até o dia do ensaio e um total 128mm em todo mês de janeiro. No dia do ensaio, a temperatura máxima alcançou os 28,4°C, a temperatura média

superficial do solo em torno de 24,2°C, a umidade relativa mínima do ar chegou a 42% e verificou-se um teor de 15% de umidade média superficial do solo.

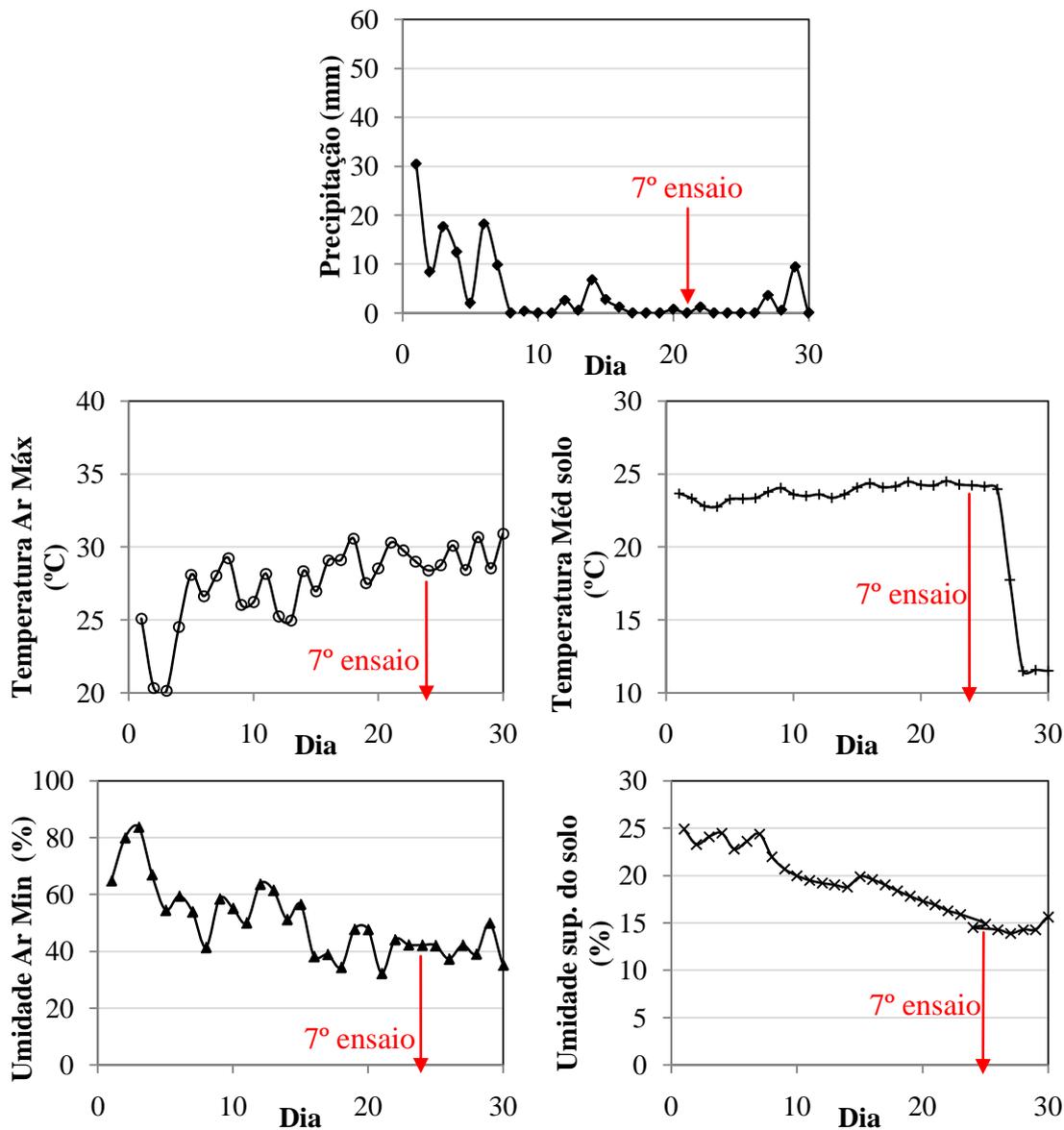


Figura 4.28 – Dados meteorológicos do mês de janeiro de 2011.

#### 4.4.1.8- OITAVA ETAPA DE ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO

A oitava etapa de ensaios compreendeu o oitavo ensaio de infiltração e oito furos de inspeção de umidade. O ensaio foi realizado no dia 21 de fevereiro 2011 e, conforme a Figura 4.29, observou-se que, na data do ensaio, não houve chuva. Entretanto, verificou-se um valor acumulado de chuvas de 139mm até o dia do ensaio e um total 188mm em todo mês de fevereiro. No dia do ensaio, a temperatura máxima alcançou os 28,2°C, a temperatura média

superficial do solo em torno de 23°C, a umidade relativa mínima do ar chegou a 47% e apresentava-se um teor de 23% de umidade média superficial do solo.

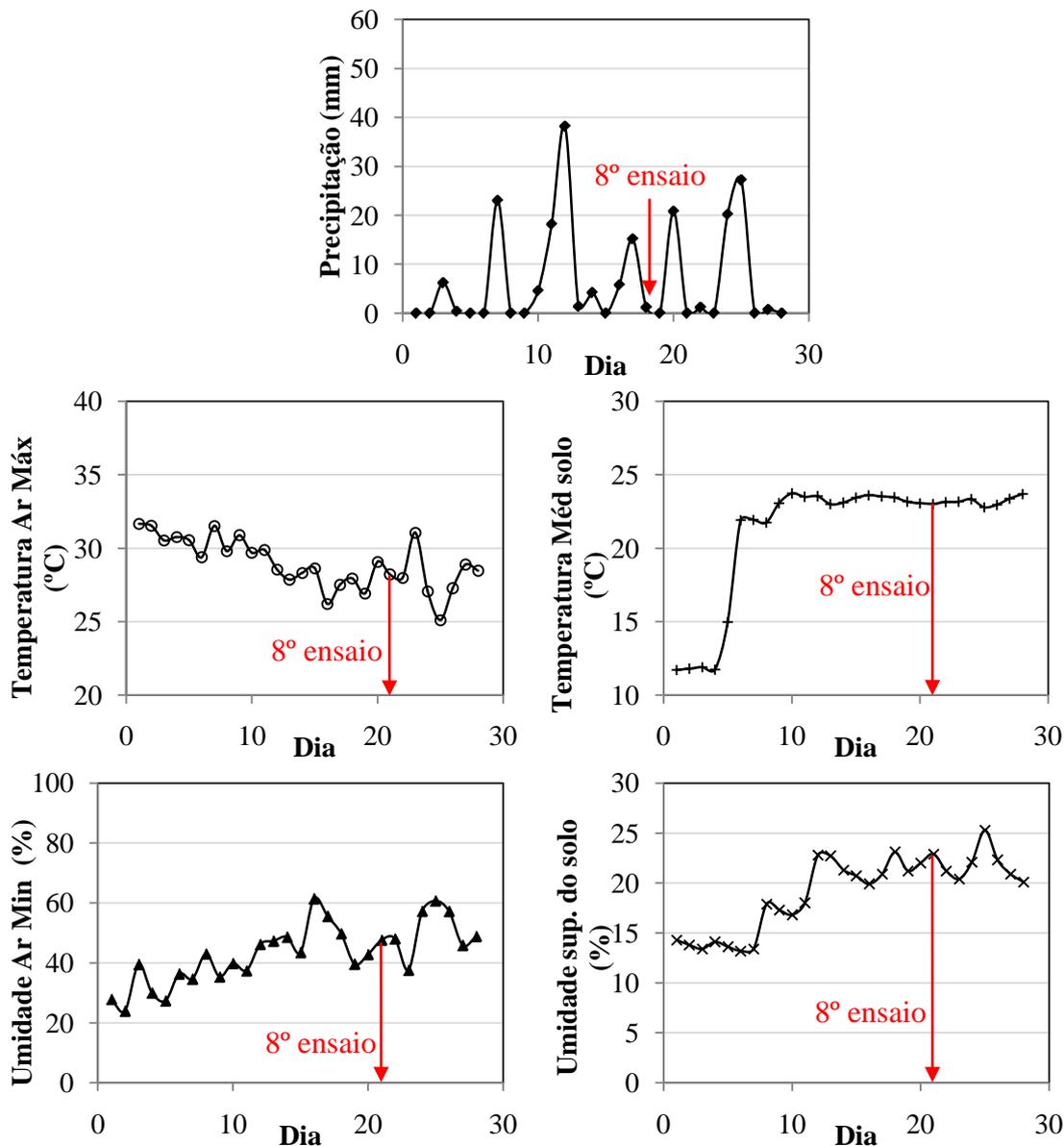


Figura 4.29- Dados meteorológicos do mês de fevereiro de 2011.

#### 4.4.2- PERFIS DE UMIDADES

É preciso inicialmente considerar que o solo, durante o estudo, foi submetido a dois processos de infiltração distintos: o oriundo das precipitações com infiltração a partir da superfície do terreno e o oriundo dos ensaios em furos executados a trado com fluxo vertical a partir do seu fundo e predominantemente horizontal a partir de suas paredes laterais. O oriundo das precipitações definem o estado inicial do solo e o proveniente da infiltração

alterou progressivamente o estado do maciço durante o ensaio. Em ambos os casos a capacidade de infiltração foi afetada.

Por efeito da precipitação o processo de umedecimento do maciço iniciou-se quando a água se infiltrou na superfície do terreno propagando por gravidade para as camadas mais profundas até encontrar o nível d'água ou o estrato impermeável. Durante eventual saturação do maciço, o fluxo tendeu a tornar-se estável. Cabe salientar que os volumes precipitados não são geralmente capazes de saturar todo o perfil de solo, mas apenas as camadas mais próximas à superfície, fato que determina um perfil típico em que a umidade decresce com a profundidade, conforme ilustrado na Figura 4.30 (linha cheia).

Com a interrupção do fluxo de água na superfície, modifica-se o perfil típico, pois interrompe-se o processo de infiltração a partir da superfície e a água, antes infiltrada, passa a se redistribuir no interior do maciço (segunda curva da Figura 4.30). Cumpre observar que, muitas vezes, nem toda a água foi transferida para as camadas mais profundas do solo, haja vista que a permeabilidade horizontal é um fator a se considerar e que parte da umidade presente nas camadas mais superficiais é transferida para a atmosfera pela evapotranspiração. Cabe salientar ainda que, no processo de infiltração, o avanço da frente de saturação pode ser bloqueado pela fase ar colocada sob pressão e pela coluna de água descendente que se infiltra.

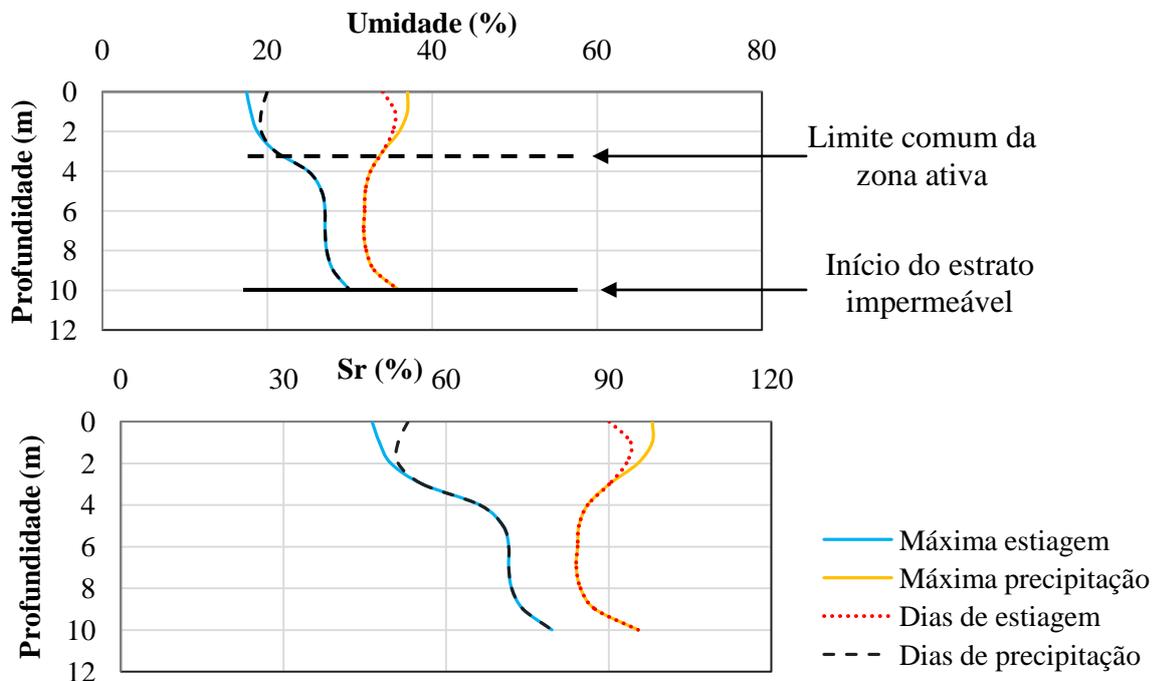


Figura 4.30– Perfil típico de umidade.

Os resultados dos ensaios de infiltração realizados em campo para o monitoramento do perfil de umidade corroboraram este comportamento descrito, haja vista que os perfis de umidade antes dos ensaios de infiltração apresentaram umidades variando segundo o período de realização dos ensaios apesar de certa influência da água infiltrada durante os ensaios, principalmente no caso de maior proximidade de datas entre eles (Figuras 4.31a, 4.32a, 4.33a e 4.34a). Após a infiltração, observou-se uma mudança do comportamento inicial nos pontos mais próximos ao furo de onde se realizou o ensaio de infiltração, em que houve um aumento nas umidades, como se destaca nas Figuras 4.31b e 4.32b.

Nos primeiros furos (Figura 4.31), observou-se um aumento das umidades em todos os ensaios realizados, ou seja, o solo nesse ponto (a 0,20m do furo de infiltração) mantinha contato com a água do ensaio de infiltração em qualquer época do ano. O sexto ensaio, entretanto (em que a precipitação máxima atingia em torno de 50mm), determinou as maiores umidades e um perfil que apresentou influências de umidade em torno de 40% nas profundidades próximas ao fundo do furo principal. Destaca-se que as maiores interferências da infiltração no perfil de umidade ocorreram após a profundidade de 0,5m.

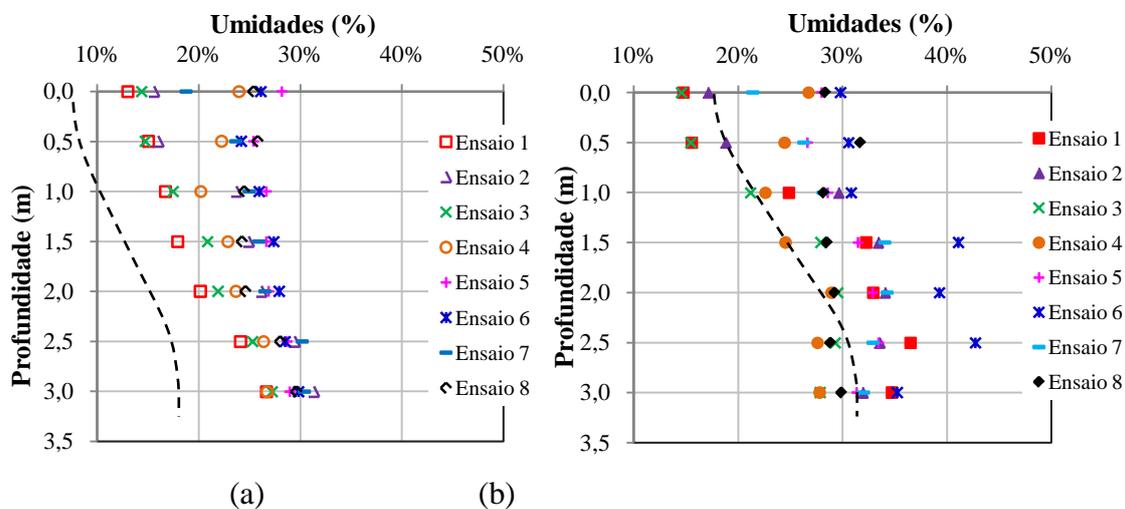


Figura 4.31 – Perfis de umidade dos ensaios de infiltração 1º furo: a) antes e b) depois.

Nos segundos furos (antes e depois), observou-se um sensível aumento nas umidades depois do ensaio de infiltração. Nestes furos, o ensaio seis também se destacou, uma vez que apresentou umidades superiores aos demais ensaios (Figura 4.32).

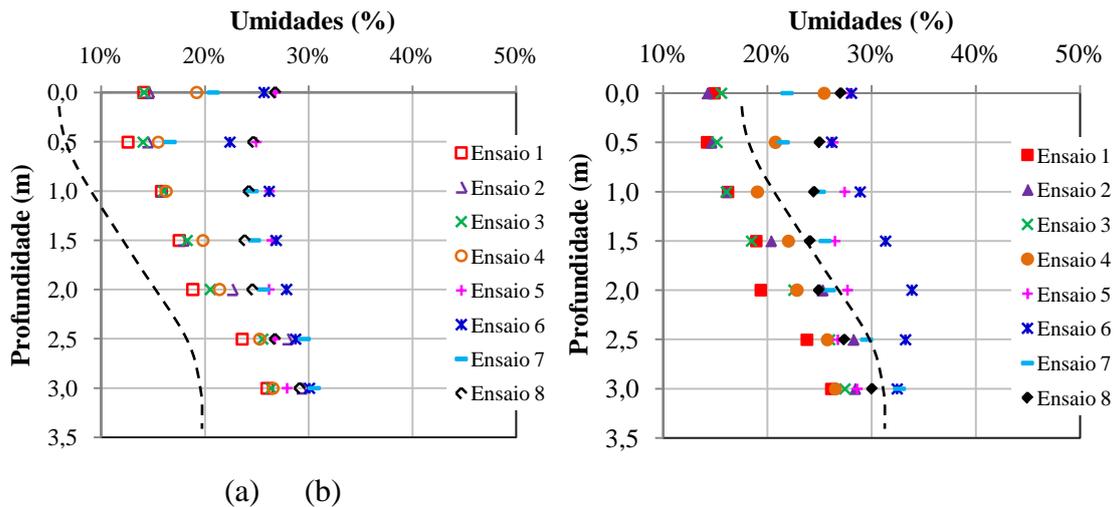


Figura 4.32– Perfis de umidade dos ensaios de infiltração 2º furo: a) antes e b)depois.

Nos furos três e quatro (ante e depois), não foram observadas modificações representativas das umidades antes do ensaio em relação às umidades aferidas após o ensaio. Esse fato se deve à influência da infiltração; pois, por mais que a permeabilidade horizontal seja semelhante à vertical, a gravidade e a percolação da água no ensaio de infiltração favorecem a infiltração na vertical. Isso não permite, portanto, que grandes volumes de água cheguem às distâncias onde as amostras foram coletadas (Figuras 4.33 e 4.34).

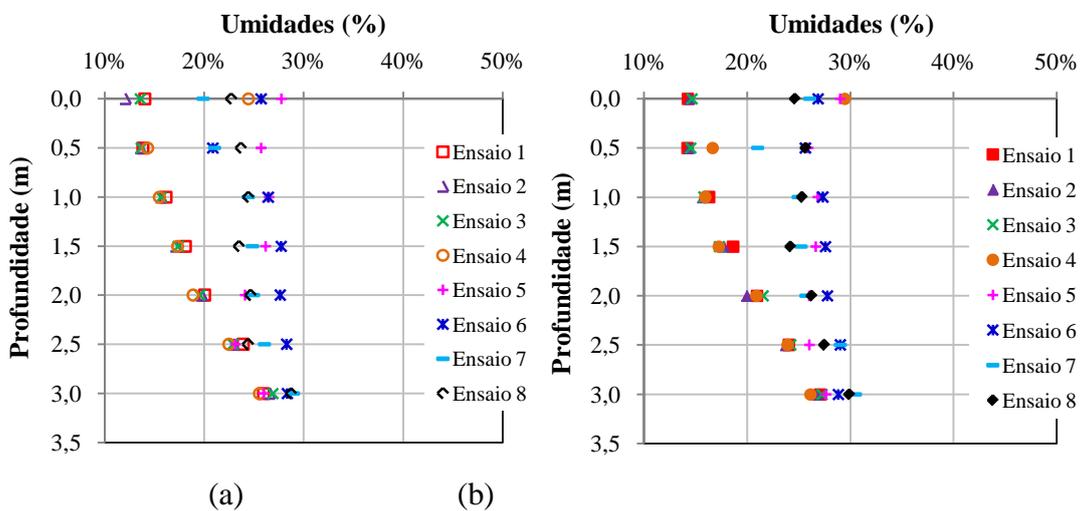


Figura 4.33– Perfis de umidade dos ensaios de infiltração 3º furo: a) antes e b)depois.

Na comparação dos perfis de umidade (antes e depois dos ensaios de infiltração), observou-se que a infiltração proporcionada pelo furo de sondagem possui maior influência a partir 0,5m de profundidade.

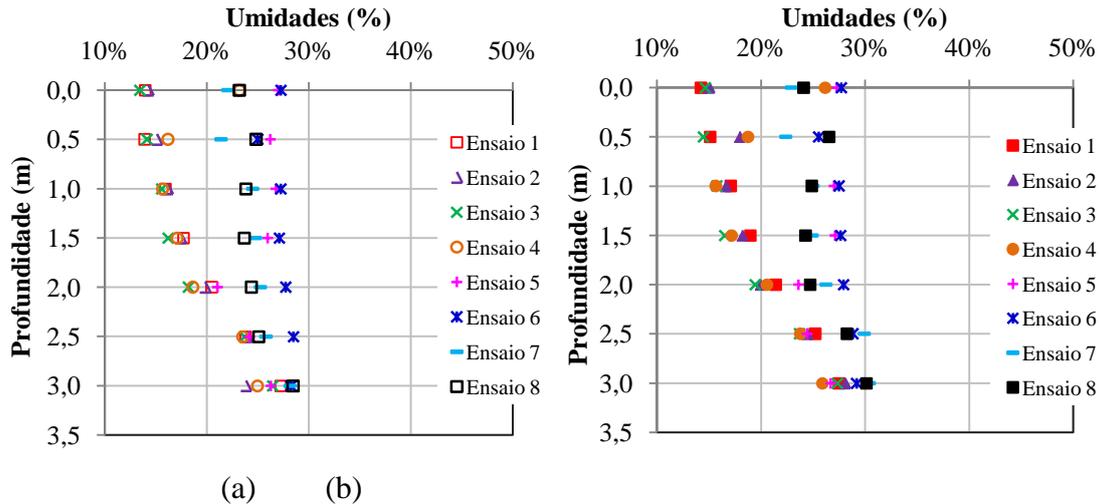


Figura 4.34 – Perfis de umidade dos ensaios de infiltração 4º furo: a) antes e b) depois.

O perfil acima (Figura 4.30) apresenta o comportamento da umidade em profundidade com fluxo de água na superfície. Após ensaios de infiltração em furo de sondagem e o monitoramento do perfil de umidade, pode-se determinar o comportamento da umidade em profundidade com fluxo de água a partir de um furo de sondagem, como apresenta a figura 4.35.

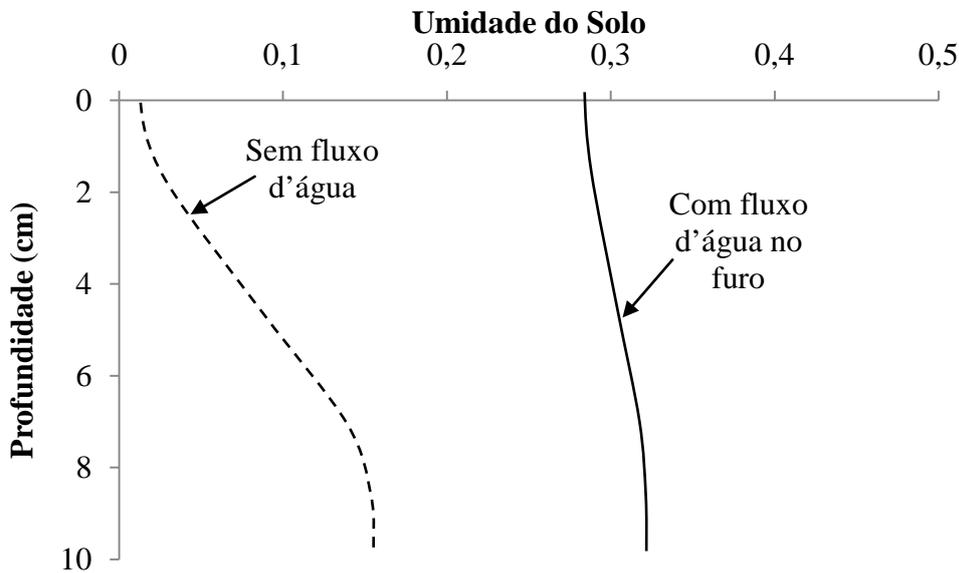


Figura 4.35– Perfil de umidade em solo a partir de um fluxo d’água em furo de sondagem.

Este comportamento (Figura 4.35) tem influência do histórico de infiltração ocorrido no furo e da precipitação acumulada na área. Observa-se, contudo, que, nos furos mais próximos do furo principal de infiltração, a influência da umidade mostra-se perturbadora no perfil nos ensaios que ocorrem em épocas de precipitações altas na região (Figuras 4.31b e 4.32b),

demonstrando que a permeabilidade horizontal que esta diretamente ligada às características das camadas é responsável pelo avanço da umidade de cada camada.

#### **4.4.3- PERFIS DE UMIDADES SEGUNDO MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO**

Para uma melhor visualização dos perfis de umidade, utilizaram-se os métodos geoestatísticos de interpolação IDW e Krigagem. Ao empregar o programa Arqgis, foram geradas superfícies contínuas de umidade a partir dos resultados obtidos para as amostras coletadas antes e após os ensaios de infiltração. A geoestatística é usada como ferramenta auxiliar, visto que permite estabelecer um modelo de semi-variograma que melhor descreve a variabilidade espacial dos dados, o qual é usado no processo de interpolação.

Na Figura 4.36a, observam-se as superfícies obtidas a partir das umidades determinadas nos furos de inspeção de umidade da 1ª etapa. Nesse caso e no das demais figuras, os dados da esquerda em relação ao eixo central correspondem às informações anteriores e os da direita, posteriores ao ensaio. Com base nos perfis de umidade obtidos antes do primeiro ensaio de infiltração, se observou uma distribuição de umidade em que, na superfície, ela varia em torno de 13%, com crescimento gradual até a profundidade de 3m e atinge aproximadamente 26%. Com base nos perfis de umidade 1D, 2D, 3D e 4D, obtidos depois do primeiro ensaio de infiltração, se observou uma distribuição de umidade em que ela varia de aproximadamente 14% na superfície até aproximadamente 34% próximo ao fundo do furo de infiltração.

Analisando-se os dados de precipitação até a data do ensaio (11/08/2010), verificou-se que não houve ocorrência de chuvas por um período de 77 dias antes do ensaio de infiltração. Por este motivo, observou-se uma semelhança com o perfil típico apresentado na Figura 4.35 em que a umidade cresce com profundidade. Comparando-se os dois perfis interpolados, antes e após a infiltração, observou-se que o perfil de umidade só sofreu variação com a infiltração até, no máximo, 0,5m de distância do furo, apresentando ainda um crescimento gradual com a profundidade. Nos demais pontos, não foram verificadas mudanças significativas desde a superfície até 3,0 m de profundidade. A Figura 4.36a, com o perfil interpolado pelo método da krigagem, apresenta uma passagem mais suave dos acréscimos de umidade no fundo do furo principal de infiltração para o maciço.

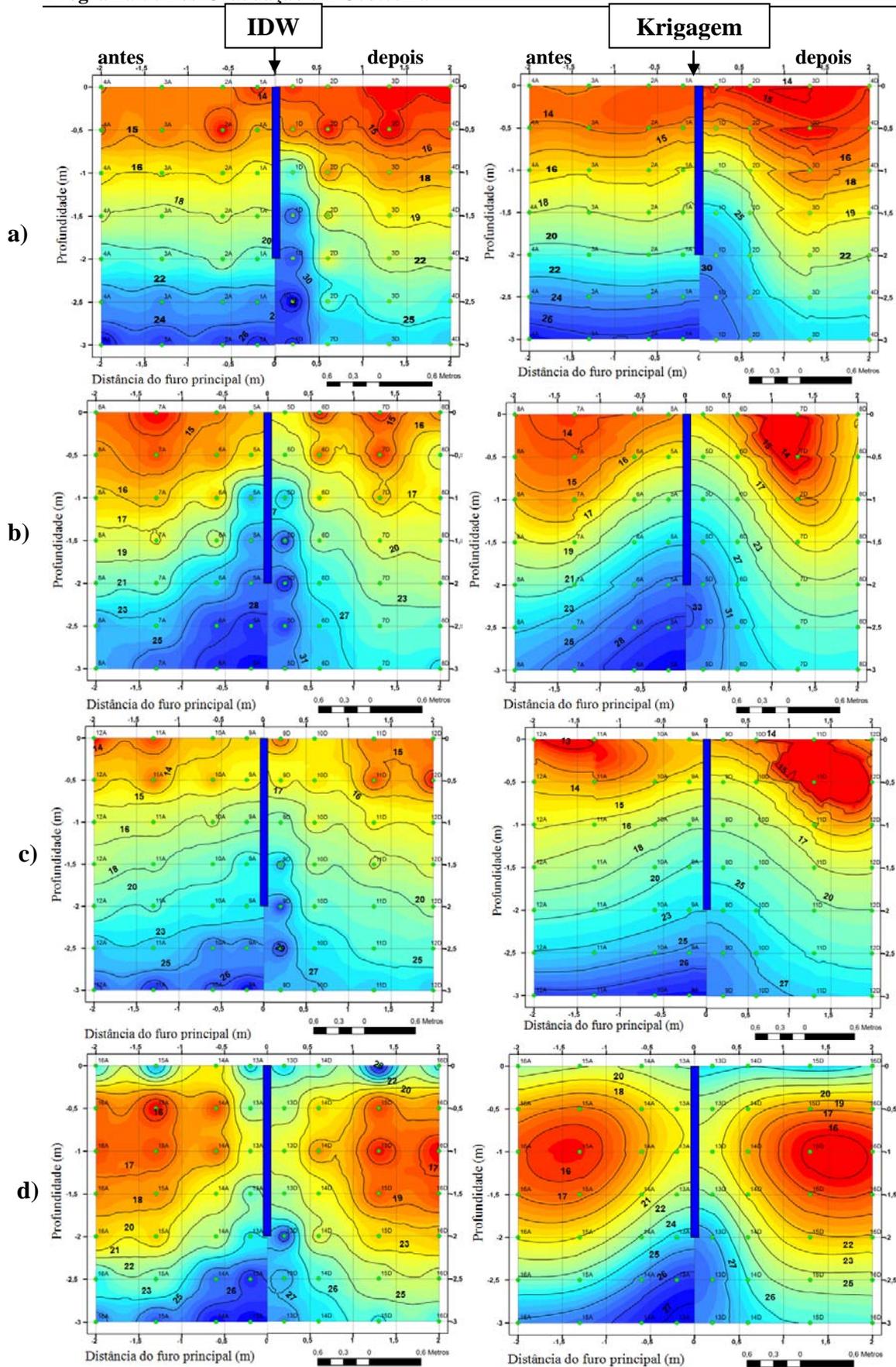


Figura 4.36 –Superfície de umidade: a) 11/08/10, b).14/08/10, c).29/09/10, d) 21/10/10.

Nas Figuras 4.36b, observaram-se as superfícies obtidas a partir das umidades determinadas nos furos de inspeção de umidade da 2ª etapa de ensaio de infiltração, a saber: 5A, 6A, 7A e 8A (antes do ensaio de infiltração). Nesses furos, observou-se um perfil em que na superfície a umidade variou em torno de 15%, com crescimento gradual até a profundidade de 3,0m onde atingem umidades em torno de 28%; Foram obtidas também as superfícies 5D, 6D, 7D e 8D (depois do ensaio de infiltração), nas quais se observou um perfil de umidade que variou de 15% na superfície até 33% de umidade próximo ao fundo do furo de infiltração.

Analisando os dados de precipitação até a data do 2º ensaio (14/08/2010), observou-se que não houve ocorrência de chuvas por um período de 80 dias. Comparando-se os dois perfis interpolados, verificou-se que o perfil de umidade ainda apresentava-se com o comportamento semelhante ao perfil apresentado após o 1º ensaio de infiltração. Pode-se inferir que sofreu influência do ensaio realizado três dias antes, com maiores umidades próximo ao fundo do furo de infiltração. Após o 2º ensaio, observou-se um crescimento gradual da umidade com a profundidade nos pontos até 0,5m de distância do furo. Nos demais pontos, não se observaram mudanças significativas da superfície de distribuição das umidades até 3,0 m.

Na Figura 4.36c, observaram-se as superfícies criadas a partir das umidades determinadas nos furos de inspeção de umidade da 3ª etapa, a saber: 9A, 10A, 11A e 12A (antes do ensaio de infiltração). Nessas, observou-se um perfil em que, na superfície, a umidade varia em torno de 14% com crescimento gradual até a profundidade de 3m, na qual verificaram-se umidades em torno de 26%; Foram obtidas outras quatro superfícies (9D, 10D, 11D e 12D - depois do ensaio de infiltração), nas quais verificou-se um perfil de umidade que varia de 15% na superfície até 29% de umidade próximo ao fundo do furo de infiltração.

Analisando-se os dados de precipitação até a data do 3º ensaio (29/09/2010), observou-se que não houve ocorrência de chuvas por um período de 124 dias anterior a ele. Comparando-se os dois perfis interpolados, observou-se que o perfil de umidade não apresenta semelhança de distribuição de umidade com o perfil apresentado após o 2º ensaio de infiltração. O intervalo de 15 dias foi suficiente para dissipar a grande parte da água infiltrada no segundo ensaio. Percebeu-se, no entanto, ao se comparar as distribuições de umidade de antes do 1º ensaio às de antes do 3º, que, enquanto nas camadas mais superficiais, inferiores a 1m, ocorreu a desidratação do solo. A partir dessa profundidade, principalmente junto ao furo de ensaio, percebeu-se ainda a influência do 2º ensaio realizado. Após o 3º ensaio, observou-se um

crescimento gradual da umidade com a profundidade nos pontos até 0,5m de distância do furo. Nos demais pontos, não foram observadas mudanças significativas desde a superfície até 3,0 m de profundidade.

As Figuras 4.36d ilustram as superfícies obtidas a partir das umidades determinadas nos furos de inspeção de umidade da 4ª etapa (21/10/2010): 13A, 14A, 15A e 16A (antes do ensaio de infiltração), em que se observa um perfil cujas umidades variam de 16% até 26% e; 13D, 14D, 15D e 16D (depois do ensaio de infiltração). Nessas se observa um perfil de umidade em que as mesmas variam de 17% até 27% de umidade, próximo ao fundo do furo de infiltração.

Analisando-se os dados de precipitação na data de realização do 4º ensaio (21/10/2010), constata-se que não houve ocorrência de chuvas. Todavia, analisando-se os dados de precipitação do mês de outubro, a estiagem de 129 dias teve fim no dia 02/10/2010 com uma precipitação de 39mm. Após esta data, apresentaram-se outras ocorrências de chuva que culminaram em um acumulado de 143mm até a data deste ensaio (Figura 4.22). Vale acrescentar que, com as chuvas, as camadas mais próximas à superfície apresentam um aumento gradual de umidade (Figura 4.16) e a umidade superficial no dia do ensaio apresentou-se próxima a 19%.

Comparando-se os dois perfis interpolados, observou-se que o perfil de umidade apresentou um comportamento diferenciado dos demais, tendo em vista que as camadas superficiais apresentaram-se com umidades mais elevadas pela ocorrência de chuvas. Após 1,5m de profundidade, constatou-se certa semelhança com o perfil apresentado após o 3º ensaio de infiltração apesar de já decorridos 22 dias, com umidades maiores próximas ao fundo dos furos.

Ainda se analisando os dados de clima para este ensaio (Figura 4.19), observou-se que houve um aumento das temperaturas tanto do ar quanto da superfície do solo, fator que também está ligado a mudança climática que ocorre na região e interfere diretamente na capacidade de infiltração.

Acrescenta-se que, na distribuição de umidades referente à 4ª etapa (Figuras 4.36d), o avanço de umidade ocorreu em dois sentidos: de forma crescente, houve aumento da umidade a partir da superfície devido às chuvas localizadas e, de forma decrescente, a partir do furo de infiltração localizado mais ao fundo do furo, devido à ação da gravidade. Com isso, observou-

se uma conservação das umidades naturais em duas regiões, ou seja, o avanço de umidade, pelos dois sentidos, demoraram a alcançar estas regiões, permitindo com que as umidades naturais se mantivessem mais baixas antes dos fluxos de água. Essas regiões delimitam-se na horizontal à 0,5m da superfície até 1,5m de profundidade e, na vertical, inicia gradativa diminuição da umidade a partir de 0,5m de distância do furo de infiltração.

Na Figura 4.37a, observaram-se as superfícies criadas a partir das umidades determinadas nos furos de inspeção de umidade da 5ª etapa: 17A, 18A, 19A e 20A (antes do ensaio de infiltração), onde se constatou um perfil de umidade que variou em torno de 24% até 28% e; 17D, 18D, 19D e 20D (depois do ensaio de infiltração), onde se reconheceu um perfil de umidade que varia de 24% até 30% de umidade próximo ao fundo do furo principal.

Analisando-se os dados de precipitação na data de realização do 5º ensaio (27/11/2010), constatou-se que ocorreu uma precipitação de 2mm. Contudo, analisando-se os dados de precipitação do mês de novembro, antes dessa data, apresentaram-se outras ocorrências de chuva que culminaram em um acumulado de 181mm até a data do ensaio. Vale acrescentar que, com o aumento das chuvas acumuladas, as camadas mais próximas à superfície apresentaram um aumento gradual de umidade. Assim, no dia do ensaio, apresentou-se na superfície uma umidade próxima a 20%. Observou-se, ainda, que houve um aumento nas temperaturas tanto do ar quanto da superfície do solo desde a etapa anterior.

Comparando-se os dois perfis interpolados, observou-se que a distribuição de umidade comportou-se de modo distinto dos demais, haja vista que as camadas superficiais apresentaram-se com umidades mais elevadas devido às precipitações ocorridas. No perfil de distribuição de umidade correspondente à fase antes do ensaio, observou-se a influência das chuvas deslocando a frente de umidade da profundidade de 0,50m correspondente à etapa anterior para 1,5m nesta etapa.

Observando-se a Figura 4.37b, verificou-se as superfícies obtidas a partir das umidades determinadas nos furos de inspeção de umidade da 6ª etapa, a saber: 21A, 22A, 23A e 24A (antes do ensaio de infiltração), nas quais se observou um perfil de umidade que variava de 23% até 29% e; 21D, 22D, 23D e 24D (depois do ensaio de infiltração), onde se observa um perfil de umidade que varia de 26% até 36% de umidade próximo ao fundo do furo principal.

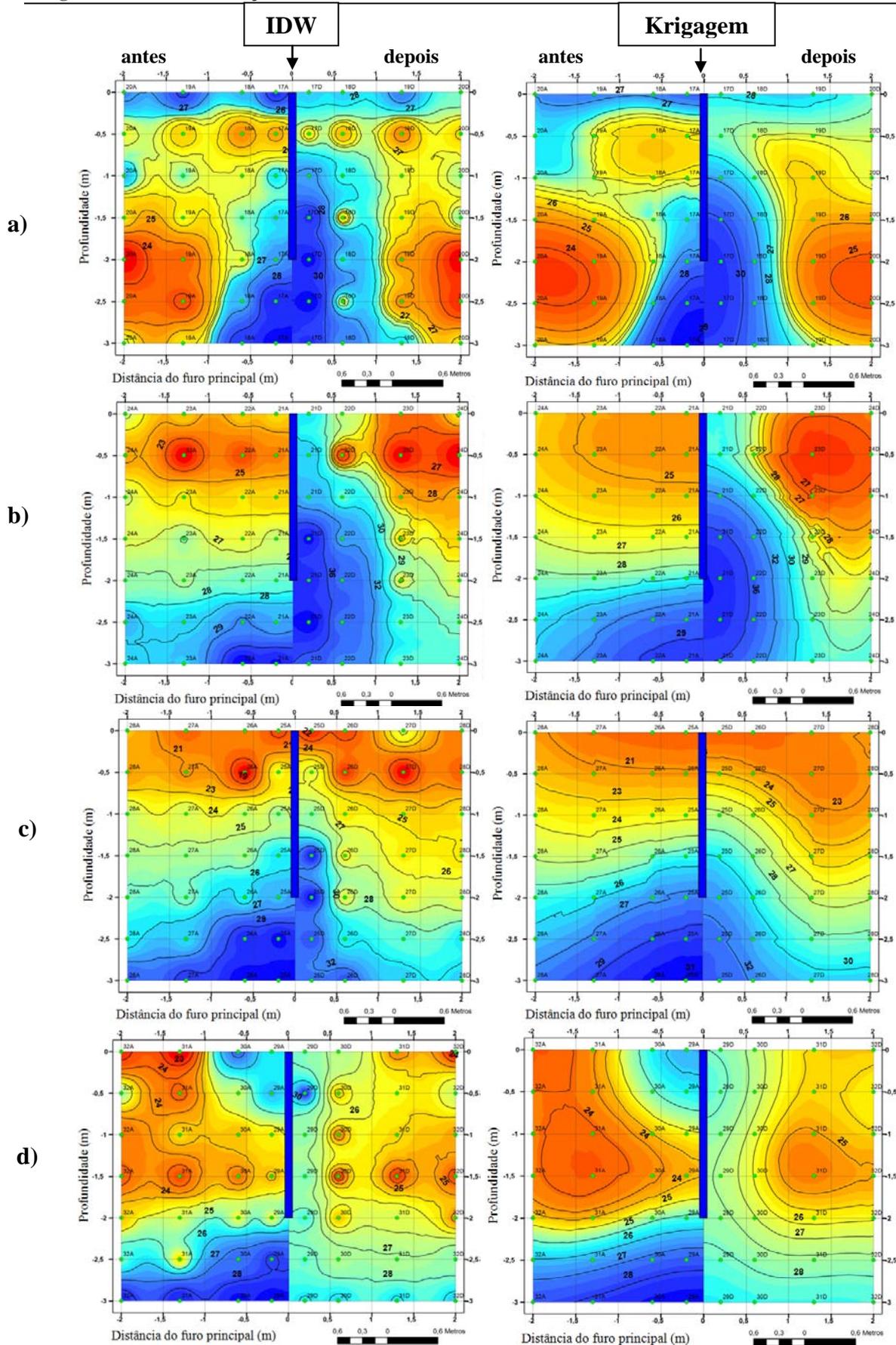


Figura 4.37 –Superfícies de umidade: a) 27/11/10, b).10/12/10, c).24/01/11, d)21/02/11.

Analisando-se os dados de precipitação na data de realização do 6º ensaio (10/12/2010), constatou-se que ocorreu uma precipitação de 3mm neste dia. Porém, analisando-se os dados de precipitação do mês de dezembro, concluiu-se que, antes dessa data, houve uma precipitação acumulada no mês até a data do ensaio proporcionalmente semelhante à ocorrida no mês de novembro, 86mm até a data deste ensaio. Após essa data, ocorreu um aumento das precipitações chegando-se a 358mm em todo o mês de dezembro. Vale acrescentar que, com a diminuição das chuvas acumuladas, as camadas mais próximas à superfície apresentavam uma diminuição de umidade e, por isso, no dia do ensaio apresentou-se na superfície uma umidade próxima a 18%.

Comparando-se os dois perfis interpolados, observou-se que o perfil de umidade antes do ensaio determinou um comportamento semelhante aos perfis apresentados até o 3º ensaio, ou seja, com um aumento de umidade com a profundidade, ou seja, esse período em que o acumulado e a frequência de chuvas diminuíram foi suficiente para a dispersão das altas umidades localizadas como apresentadas no perfil do 5º ensaio. No perfil após o ensaio, o comportamento recordou o ensaio anterior, em que a infiltração determinou um aumento de umidade na área periférica ao furo principal de infiltração, elevando assim o avanço de umidade até próximo a superfície.

Na Figura 4.37c, observaram-se as superfícies criadas a partir das umidades determinadas nos furos de inspeção de umidade da 7ª etapa: 25A, 26A, 27A e 28A (antes do ensaio de infiltração), em que se observa um perfil de umidade que varia em torno de 21% até 29% ; e 25D, 26D, 27D e 28D, depois do ensaio de infiltração, em que se observou um perfil de umidade que varia de 22% até 32% de umidade próximo ao fundo do furo principal. Salienta-se que esse ensaio foi realizado após 45 dias do ensaio anterior (ensaio 6).

Analisando-se os dados de precipitação na data de realização do 7º ensaio (24/01/2011), percebeu-se que não houve ocorrência de chuva. Até a data do ensaio, observou-se uma diminuição gradual da frequência de chuvas do início do mês até o final, acarretando em um acumulado de 115mm até a data do ensaio, 90% disso ocorreu nos seis primeiros dias do mês, determinando uma diminuição da umidade superficial, apresentada no dia do ensaio, em torno de 15%.

Comparando-se os dois perfis interpolados, observou-se que o perfil de umidade antes do ensaio apresentou um comportamento que corrobora os perfis apresentados no ensaio anterior,

uma vez que ocorreu um aumento de umidade com a profundidade. Esta observação pode estar ligada à diminuição das frequências de chuva, principalmente nos 18 dias que antecederam o ensaio. No perfil após o ensaio, o comportamento recordou os três primeiros ensaios, em que a infiltração determinou um aumento de umidade próxima ao fundo do furo principal de infiltração.

Ainda analisando os dados de clima para este ensaio (Figura 4.19), observou-se uma diminuição gradual das umidades tanto do ar quanto da superfície do solo, fator que também está ligado à mudança climática que ocorre na região.

Na Figura 4.37d, observaram-se as superfícies criadas a partir das umidades determinadas nos furos de inspeção de umidade da 8ª etapa, a saber: 29A, 30A, 31A, 32A (antes do ensaio de infiltração), nas quais se observou um perfil de umidade que varia desde 23% até 28% e; 29D, 30D, 31D e 32D, depois do ensaio de infiltração, em que se registrou um perfil de umidade que varia de 25% até 30% de umidade próximo ao furo principal.

Analisando-se os dados de precipitação na data de realização do 8º ensaio (21/02/2011), realizado 29 dias após o ensaio anterior, constatou-se que não houve ocorrência de chuva. Até a data do ensaio, observou-se um crescimento gradual da frequência e do acumulado de precipitação (139mm). Esse aumento de precipitação estabeleceu um aumento crescente nas umidades mínimas do ar e médias do solo superficial apresentados no dia do ensaio - 47% e 23%, respectivamente.

Observou-se, ainda, um perfil em que umidade superficial apresentou-se significativa e o acréscimo de chuvas determinou um comportamento com duas frentes de umedecimento: uma foi pela superfície e a outra, pelo furo de infiltração.

Diante do exposto, depreende-se que o perfil de umidade varia conforme a superfície de aporte d'água e que, dependendo da época do ano, somou-se a precipitação na superfície aos volumes infiltrados em pontos distintos. Ainda, observou-se que o perfil de umidade de solo apresenta memória de infiltrações anteriores.

Observando os perfis de umidade de acordo com os interpoladores, observou-se que o método IDW cria uma superfície de umidades, dando maiores pesos aos pontos de entrada e interpolando apenas os pontos entre si. Esse método tem como vantagem apontar resultados que necessitam de maior atenção ou mesmo identificar pontos defeituosos. O perfil de

umidade criado por este interpolador apresentou pequenas erupções no meio do perfil, erupções que são os valores reais dos pontos não interpolados. Em contrapartida, o método de Krigagem apresenta uma superfície de umidade homogênea na qual as mudanças de umidade apresentam-se de forma mais sensível, haja vista que esse método interpola todos os valores (inclusive os de entrada) e permite que as isolinhas apresentem-se conforme o avanço de umidade localizado nos perfis, corroborando assim o percurso que a água delimita em sua passagem pelo solo.

#### **4.5- MATERIAIS UTILIZADOS NO ENCHIMENTO DAS TRINCHEIRAS**

Dos materiais constantes que compõem as trincheiras, as garrafas Pet mereceram maior atenção devido à pequena disponibilidade de informações sobre esse produto para fins de engenharia. Elas foram então submetidas, em laboratório, a dois ensaios: ensaio de compressão simples e ensaio de compressão confinada

##### **4.5.1- ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES**

Os ensaios de compressão simples objetivaram analisar comparativamente o comportamento de dois tipos de garrafas Pet selecionadas: a verde e a incolor. Foram selecionadas e ensaiadas garrafas verdes e incolores nas configurações inteira, cortada e cortada/acoplada (Silva, 2007).

As curvas referentes às garrafas cortadas/acopladas apresentam um ponto de inflexão e nas demais condições todas as garrafas apresentaram apenas um valor de resistência máxima. A Tabela 4.8 apresenta os resultados obtidos para os pontos de inflexão e capacidades de carga máximas. Os cálculos das capacidades de carga máxima foram executados multiplicando-se as forças mobilizadas por garrafa pelo número de garrafas contidas em 1m<sup>2</sup> e dividindo-se pela área total, no caso 1m<sup>2</sup>.

Observa-se, na Figura 4.38, que as garrafas inteiras quando solicitadas individualmente apresentam menor capacidade de carga. Espera-se, no entanto, que esta capacidade de carga medida individualmente seja ampliada quando usadas em grupo, pois restringe-se a possibilidade de flambagem. Há ainda a expectativa de que, para deformações da ordem das registradas para as garrafas cortadas e cortadas/acopladas, elas apresentem, quando inteiras, maior capacidade de carga.

Tabela 4.8 - Resultados de resistência a compressão simples das garrafas Pet.

Ensaio	Deformação Axial (%)	Carga de Plastificação (kN/m <sup>2</sup> )	Capacidade de Carga (kN/m <sup>2</sup> )
Garrafa Branca Inteira	0,6		11,8
Garrafa Branca Cortada	3,7		59,7
Garrafa Branca Cortada/Acoplada	1,9	23,0	44,6
Garrafa Verde Inteira	0,6		24,5
Garrafa Verde Cortada	2,9		54,8
Garrafa Verde Cortada/Acoplada	1,2	16,6	47,1

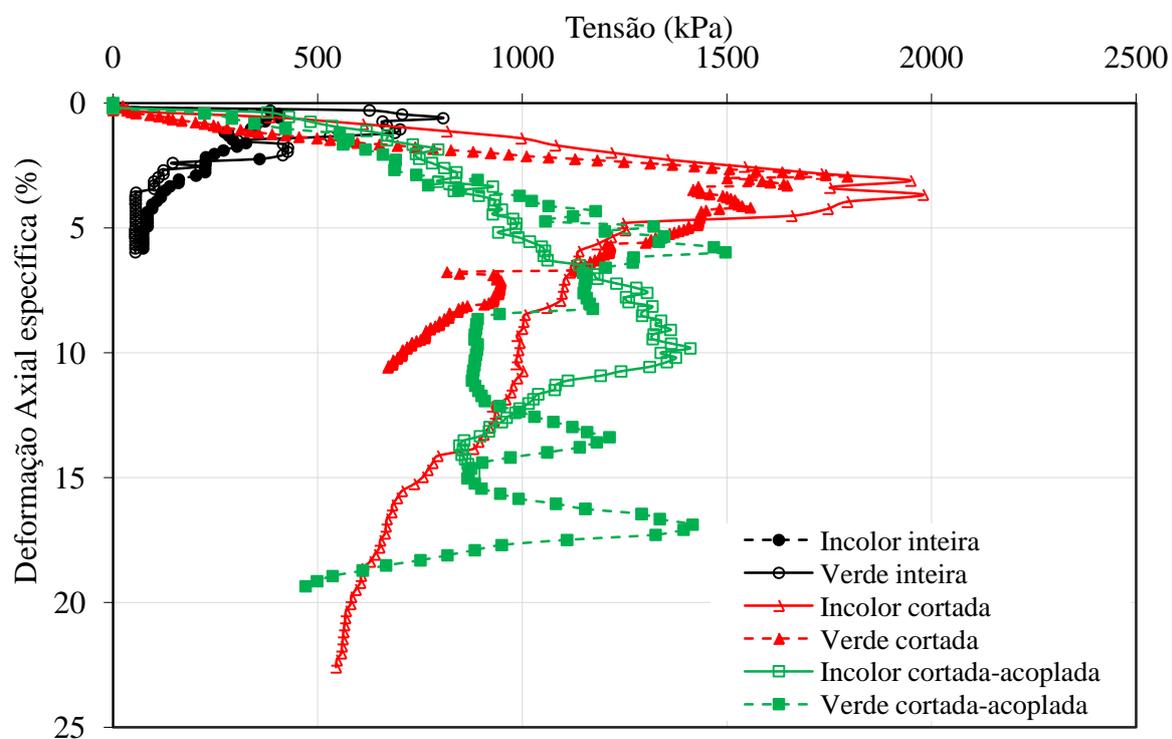


Figura 4.38 - Compressão individual das garrafas.

As garrafas cortadas ensaiadas, considerando-se a metade inferior, apresentaram capacidade de carga respectivamente no caso das garrafas incolores e verdes aproximadamente 5 vezes e 2 vezes superiores ao valores obtidos para as garrafas inteiras. No entanto, se analisados os resultados em termos de módulo de elasticidade, verificou-se que os maiores valores são obtidos para as garrafas inteiras.

No caso das garrafas cortadas/acopladas, verificou-se, inicialmente, um ponto de inflexão que foi aqui chamado de ponto de plastificação e depois, para maiores deformações, o ponto de ruptura. As deformações na ruptura, nesses casos, foram respectivamente para as garrafas incolores e verdes 4,8 vezes e 5,3 vezes superiores as deformações de plastificação. Após o ponto de inflexão, as garrafas cortadas/acopladas ainda se submetem à grandes deformações antes de apresentarem ruptura, também a cargas mais elevadas. O início de um é igual ao dobro da verificada nas garrafas inteiras submetendo-se na ruptura a maiores níveis de deformação.

Em termos de módulo de elasticidade (Tabela 4.9), os maiores valores foram obtidos para as garrafas verdes inteiras que foram iguais, a aproximadamente, o dobro das incolores na mesma condição. Quando cortadas e cortadas/acopladas, os valores de módulo de elasticidade obtidos para os dois tipos de garrafa foram relativamente próximos, contudo persistindo maiores valores para as garrafas verdes. Considerando-se o ponto de inflexão obtido para as garrafas cortadas/acopladas, os valores obtidos, nesse caso, para ambos os tipos de garrafa foram aproximadamente 25% inferiores aos obtidas para as garrafas cortadas e não acopladas.

Tabela 4.9 - Resultados de módulo de elasticidade calculados para as garrafas Pet a partir dos resultados dos ensaios de resistência a compressão simples.

Ensaio	Módulo de Elasticidade (kN/m <sup>2</sup> )	
	Na plastificação	Na ruptura
Garrafa Branca Inteira		1967
Garrafa Branca Cortada		1614
Garrafa Branca Cortada/Acoplada	1211	455
Garrafa Verde Inteira		4083
Garrafa Verde Cortada		1890
Garrafa Verde Cortada/Acoplada	1383	785

#### 4.5.2- ENSAIOS DE COMPRESSÃO DO CONJUNTO

Sabe-se que as trincheiras podem ser submetidas a carregamentos externos oriundos do sistema construtivo e de sobrecargas. Cabe destacar que o ideal seria avaliar, simultaneamente, um conjunto de garrafas dispostas como estarão *in situ* de modo a se analisar o efeito de grupo. Para simular de modo aproximado a condição de campo em duas das trincheiras estudadas, fez-se o ensaio de compressão em laboratório sobre conjuntos de garrafas amassadas e cortadas. O ensaio de compressão do conjunto de garrafas foi feito utilizando um sistema de carga composto de viga de reação, macaco hidráulico, defletômetros, célula de carga com leitora e uma panela de aço de dimensões já citadas (Figura 4.39).

Estes ensaios objetivaram avaliar comparativamente o comportamento a compressão dos arranjos construídos com garrafas amassadas e com garrafas cortadas e acopladas conforme utilizado no campo e não simular com exatidão o comportamento desses arranjos *in situ*, haja vista que as condições de contorno, determinadas em campo, não puderam ser reproduzidas de forma ideal neste ensaio de laboratório.



Figura 4.39 – Compressão dos conjuntos: garrafas cortadas-acopladas e garrafas amassadas.

Para o conjunto das garrafas amassadas, observou-se, na Figura 4.40, que ocorreu um ajuste progressivo das garrafas e que, após o segundo ciclo de carga e descarga, a deformabilidade do conjunto tende a estabilizar-se e tornar-se reversível. Obtiveram-se, no primeiro, segundo e terceiro ciclo de carga, respectivamente, módulos de elasticidade iguais a 599 kN/m<sup>2</sup>, 935 kN/m<sup>2</sup> e 973 kN/m<sup>2</sup>.

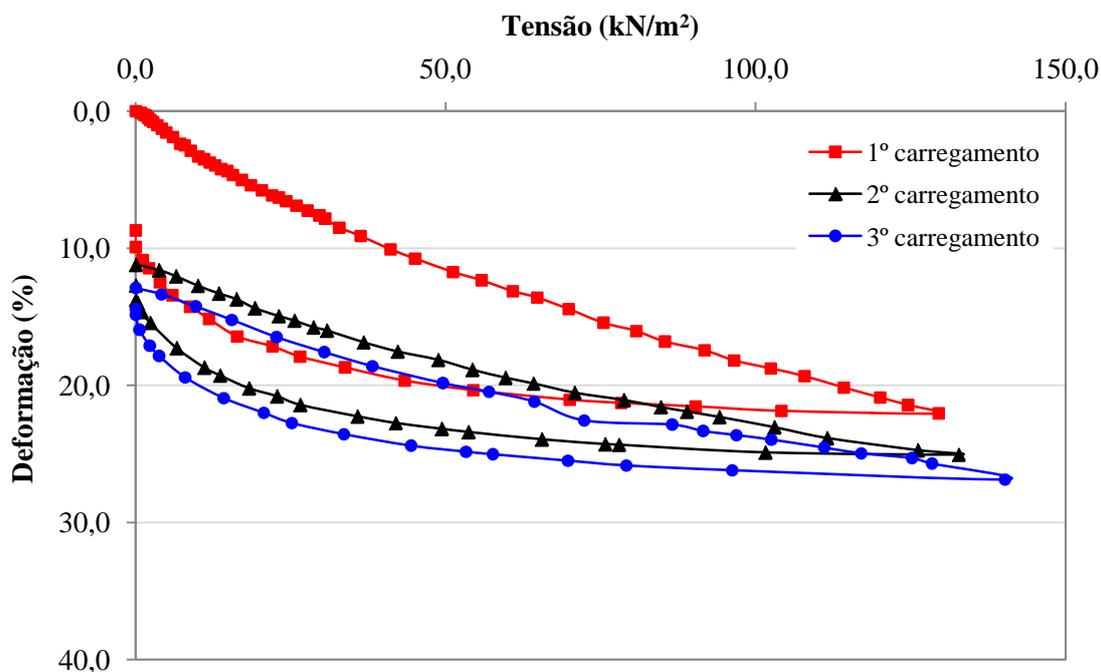


Figura 4.40 – Gráfico: Tensão *versus* Deformação do conjunto de garrafas amassadas.

Nos ensaios realizados sobre as garrafas cortadas e acopladas, ocorreu a exemplo do verificado nos ensaios de compressão simples, um ponto de inflexão a aproximadamente 5,1% de deformação para a tensão de 33 kN/m<sup>2</sup> e outro a aproximadamente 29% de deformação a partir do qual as cargas retomaram o crescimento. Para o primeiro ponto de inflexão, obteve-se, para o módulo de elasticidade, um valor muito próximo do obtido para aquele determinado no ensaio de compressão simples, 1347 kN/m<sup>2</sup>. O ensaio foi interrompido para uma tensão de 64 kN/m<sup>2</sup> com aproximadamente 36% de deformação devido a dificuldades de ordem prática para continuá-lo (Figura 4.41), fato que impediu a avaliação do módulo de elasticidade após o segundo ponto de inflexão.

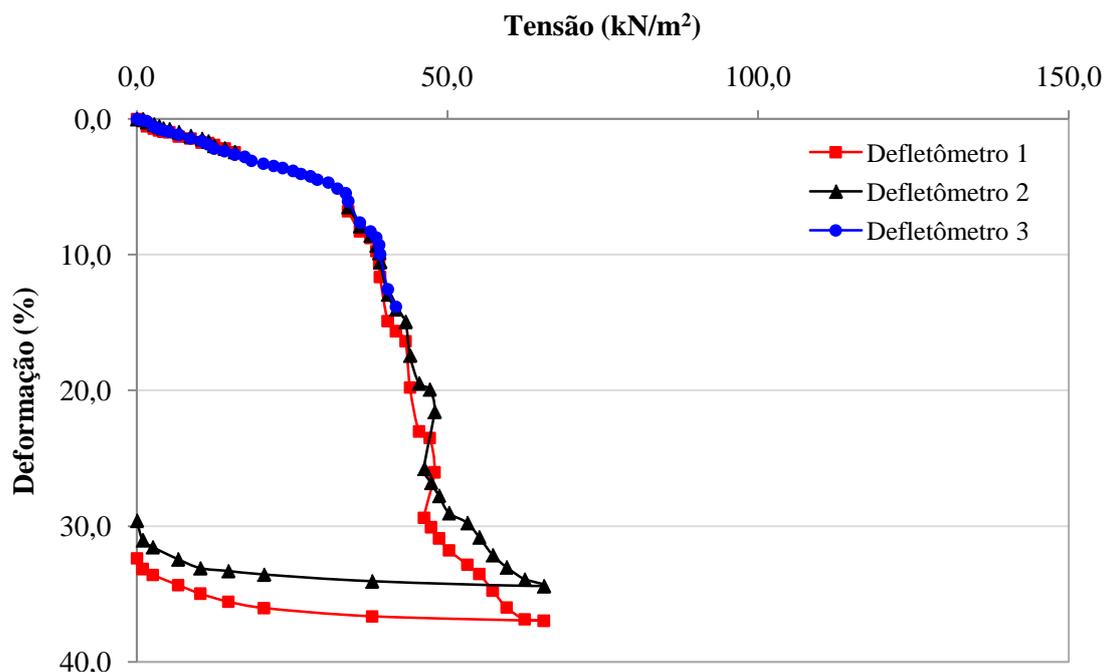


Figura 4.41 – Gráfico: Tensão *versus* Deformação do conjunto de garrafas cortadas/acopladas.

#### 4.6- ENSAIOS DE ENCHIMENTO

Com o objetivo de determinar a eficiência de cada trincheira, realizaram-se quatro etapas de ensaios de enchimento (Tabela 4.10). Esses ensaios seguiram um procedimento básico, que consistiu em adicionar água, com a utilização de um caminhão pipa, para o enchimento das trincheiras, monitorando o tempo de enchimento e de esvaziamento. Monitorou-se o solo e as trincheiras durante o procedimento com a utilização de tensiômetros (elétricos e vacuômetros), sensor de nível d'água, piezômetros e coleta de amostras de umidade dos solos. Para a realização dessa atividade, foram necessários 24 caminhões pipa contendo 11000 litros d'água cada e duas caixas d'água de 1000 litros cada, estas eram alimentadas pelos caminhões pipa com objetivo de controlar o lançamento de água dentro da trincheira.

Antes do início de cada etapa dos ensaios, foram retiradas amostras para determinação da umidade do perfil do solo próximo à trincheira. O perfil de amostragem localizava-se a 0,5m da borda da trincheira e, por meio de um trado manual, foram coletadas amostras a cada 0,5m, a partir da superfície, até 3,0m de profundidade. Logo após os ensaios, foram feitas coletas de amostra de modo semelhante para determinação de perfis de umidade. Foram ao todo realizados 48 furos de sondagem e retiradas 336 amostras para determinação das umidades tanto antes quanto após os ensaios de enchimento.

Tabela 4.10 – Etapas dos ensaios de enchimentos.

Etapa	Data	Sequência de trincheiras ensaiadas	Início do enchimento (hora)	Fim do enchimento (hora)	Fim do rebaixamento (hora)	Tempo de ensaio
1 <sup>a</sup>	19/08/2010	5	11:29	13:00	13:20	01:51
	20/08/2010	7	09:20	11:09	12:51	03:31
	20/08/2010	3	16:40	18:24	19:47	03:07
	21/08/2010	4	10:18	11:45	12:20	02:02
	22/08/2010	2	11:24	13:10	14:13	02:49
	22/08/2010	6	16:00	17:21	18:23	02:23
	23/08/2010	1	10:21	12:11	13:10	02:49
2 <sup>a</sup>	01/12/2010	4	11:20	12:41	13:00	01:40
	01/12/2010	2	15:57	17:40	18:55	02:58
	02/12/2010	5	10:10	11:32	11:56	01:46
	03/12/2010	7	9:24	11:01	12:05	02:41
	03/12/2010	1	14:38	16:03	17:09	02:31
	04/12/2010	3	10:17	11:55	13:27	03:10
	04/12/2010	6	14:10	15:41	17:22	03:12
3 <sup>a</sup>	21/02/2011	6	15:36	17:20	18:42	03:06
	22/02/2011	2	9:37	11:27	12:43	03:06
	22/02/2011	4	15:16	17:00	17:46	02:30
	23/02/2011	1	10:10	11:48	13:40	03:30
	24/02/2011	7	9:32	11:40	13:12	03:40
	26/02/2011	3	9:36	11:28	13:18	03:42
	26/02/2011	5	13:58	15:04	15:46	01:48
	26/02/2011	5 contínuo	16:02	16:52	17:04	01:02
4 <sup>a</sup>	18/07/2011	3	14:36	16:12	17:23	02:47
	20/07/2011	7	12:02	13:59	17:54	05:52
	22/07/2011	5	10:31	11:36	11:54	01:23

Conforme apresentado na Tabela 4.10, as etapas de enchimento das trincheiras foram realizadas da seguinte maneira: a 1<sup>a</sup> etapa no mês de agosto/2010 entre os dias 19 e 23; a 2<sup>a</sup>

etapa no mês de dezembro/2010 entre os dias 01 e 04; a 3ª etapa no mês de fevereiro/2011 entre os dias 21 e 26, e a 4ª e última etapa no mês de julho/2011 entre os dias 18 e 22. Controlaram-se, em cada experimento, o tempo de ensaio em cada trincheira e os horários de início e término do enchimento, bem como o tempo necessário ao esvaziamento da trincheira por infiltração no solo, tempo de rebaixamento.

Na 3ª etapa, realizou-se um ensaio de enchimento contínuo com o objetivo de observar o comportamento da trincheira a grandes volumes e a fluxos contínuos. Utilizou-se, neste procedimento, primeiramente, um determinado enchimento e esvaziamento padrão por meio o uso da caixa d'água. Posteriormente, após o rebaixamento, o enchimento foi realizado de forma contínua a partir do abastecimento do próprio caminhão pipa, permitindo assim que trincheira trabalhasse em um intervalo de tempo maior com preenchimento total com água. Esse ensaio foi realizado na trincheira 5 em função de que, nas etapas anteriores, foi a trincheira que apresentou um menor tempo de rebaixamento em relação às demais.

Nos tópicos posteriores serão discutidos os resultados de cada instrumento utilizado no monitoramento dos ensaios de enchimento.

#### **4.6.1- RESULTADOS DO SENSOR DE NÍVEL**

O sensor de nível é um instrumento utilizado para determinar, a partir da pressão de água, a altura dela em locais de difícil visualização. No presente trabalho, esse instrumento foi posicionado no centro de cada trincheira e inserido até o fundo dela, protegido por um tubo PVC e conectado a um sistema de aquisição e visualização dos dados.

A Figura 4.42a, apresenta os resultados de enchimento e rebaixamento d'água dentro das trincheiras na 2ª etapa de ensaios, a Figura 4.42b os da 3ª etapa e a Figura 4.42c os da 4ª etapa. Para a primeira etapa, houve problema no sensor e não foi possível monitorar o enchimento e rebaixamento em todas elas, apenas registrou-se o tempo inicial e final de cada fase dos ensaios.

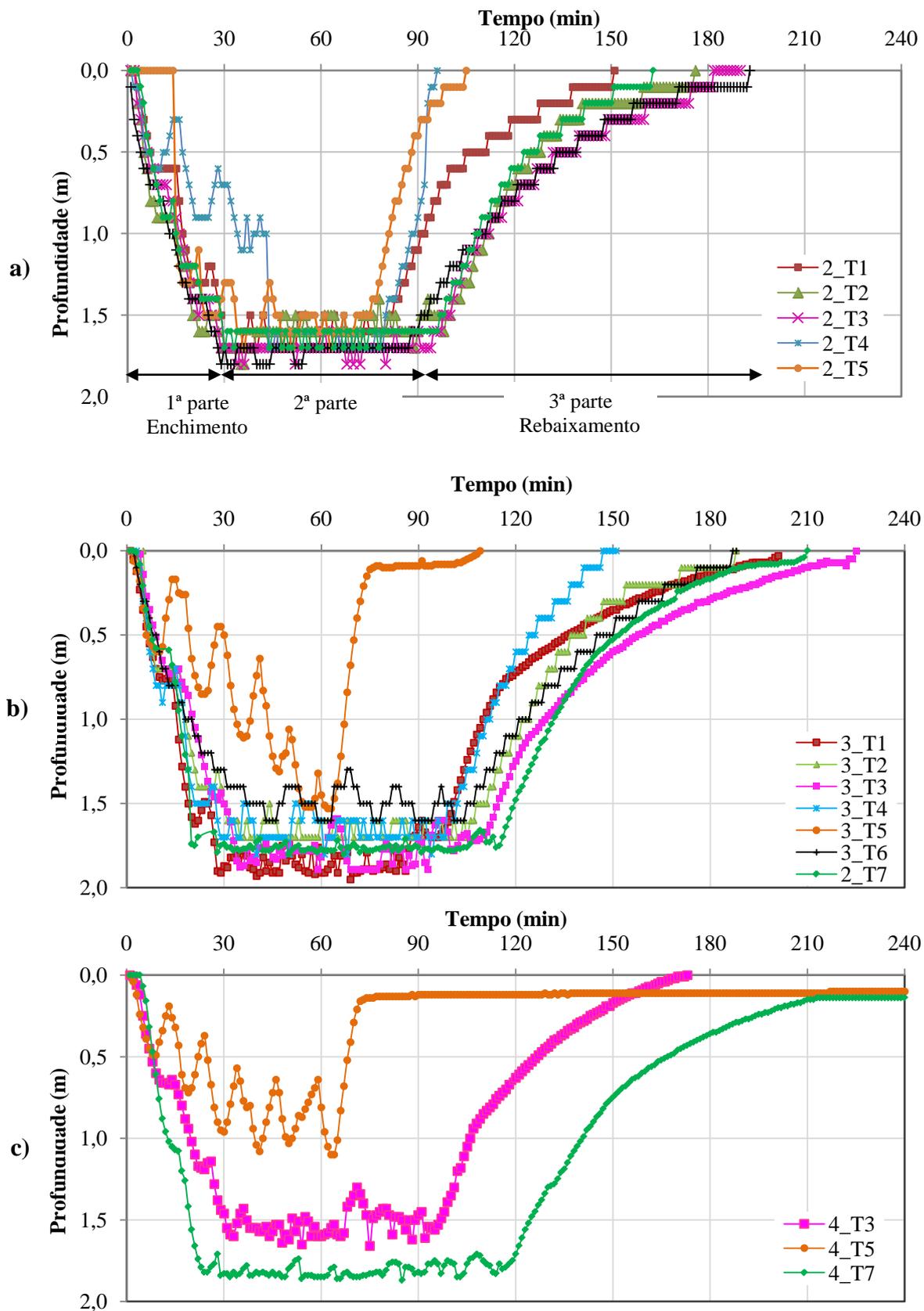


Figura 4.42 – Sensor de nível: Profundidade x Tempo: a) 2ª etapa (Dez/2010); b) 3ª etapa (Fev/2011); e c) 4ª etapa (Jul/2011).

Na primeira (1ª) parte do gráfico (fase de enchimento), observou-se que, em todas as trincheiras, com exceção da trincheira 4 (apenas brita), o enchimento total ocorreu nos 30 minutos iniciais de ensaio. Na segunda (2ª) parte do gráfico, fase em que a trincheira encontrava-se com água até sua altura máxima, cada trincheira apresentou um tempo distinto mantendo o nível d'água máximo do enchimento. A terceira (3ª) parte dos gráficos correspondeu ao processo de rebaixamento do nível d'água nas trincheiras.

Na busca de entender comparativamente o mecanismo de enchimento e rebaixamento de água nas trincheiras, fez-se necessário considerar as características da superfície de infiltração das trincheiras e a drenabilidade dos enchimentos. As garrafas Pet cortadas/acopladas possuíam o volume interno totalmente comunicável com o externo por meio de seu topo e de seis furos em sua base, cinco periféricos e um central. No entanto o escoamento por meio deles requer certo consumo de energia, ou seja, o rebaixamento fora das garrafas é mais rápido que através delas. O consumo de energia para o fluxo através das garrafas Pet gerou certo retardamento no esvaziamento como se constatará mais adiante. A brita dispunha do espaço entre os grãos para o fluxo. Foi difícil avaliação dos pontos de contato entre eles e o maciço, por meio do geotêxtil. Considerou-se que a área de inibição do fluxo era, aproximadamente, semelhante àquela gerada pelos contatos das garrafas com o maciço, ou seja, a área efetiva de fluxo na trincheira era semelhante à existente durante o uso das garrafas Pet. As Pets inteiras foram fechadas e dispostas verticalmente na trincheira o que limita o espaço preenchível com água. Estes espaços são completamente drenados, funcionando como coluna de água diretamente aplicada ao solo sem que ocorra perda de energia. Em termos de área de obstrução ao fluxo, no contato sistema de enchimento maciço por meio do geotêxtil, ela pode ser considerada como semelhante ao caso das demais trincheiras com garrafas Pet cortadas/furadas/acopladas. As garrafas Pets amassadas foram fechadas tornando o espaço interno isolado do contato com a água. Isso limitou o enchimento do espaço entre elas. No caso desta trincheira é possível admitir que parte da água permaneça retida entre as garrafas Pet, ao mesmo tempo em que a tortuosidade dos canais de fluxo gera algum retardamento no enchimento e na drenagem da água. As trincheiras com tijolos em crivo encontravam-se com quase a totalidade de seu volume disponível para enchimento.

Na Figura 4.42c, observou-se ainda, uma diferença entre os tempos de acúmulo e de rebaixamento. A trincheira 5 (PET inteira) apresentou um comportamento como se ela não determinasse o enchimento total, ou seja, o volume de água lançado infiltrou-se mais rápido

no solo do que a vazão de alimentação era capaz de abastecê-la. Isso pode ter ocorrido devido à presença de sucções elevadas no solo. Verificou-se, ainda, nesses ensaios que as garrafas amassadas geraram, nessa etapa, maior tempo de rebaixamento e total que a trincheira com garrafas Pet cortadas/furadas/acopladas.

Com base nestas considerações e levando-se em conta os dados constantes das Tabelas 3.4 e 4.8, plotou-se a Figura 4.43, separando as trincheiras compostas por brita e Pets cortadas/furadas/acopladas, daquelas compostas por Pets inteiras, Pets amassadas e sem Pets. Na Figura 4.43 essas três últimas trincheiras estão representadas em vermelho. Verifica-se, na figura, que o tempo de esvaziamento e o tempo total tendem a aumentar com o volume de Pets acopladas. Portanto, as Pets cortadas/furadas/acopladas, possuindo furos na base, atuam retardando o processo de infiltração, provavelmente devido à perda de energia no fluxo através dos furos. Para a série em vermelho, considerou-se a situação das Pets inteiras como equivalente a zero de volume de Pets cortadas, ou seja, considerou-se como equivalente à trincheira com brita. Para a trincheira em tijolos em crivo considerou-se o volume dos tijolos em crivo como equivalente ao volume de garrafas cortadas/furadas/acopladas. Finalmente, as Pets amassadas foram consideradas por possuírem efeito retardador equivalente ao das garrafas Pets cortadas/furadas/acopladas. Essas considerações pareceram satisfatórias, pois os pontos obtidos se ajustaram razoavelmente bem às tendências verificadas para as Pets cortadas/furadas/acopladas.

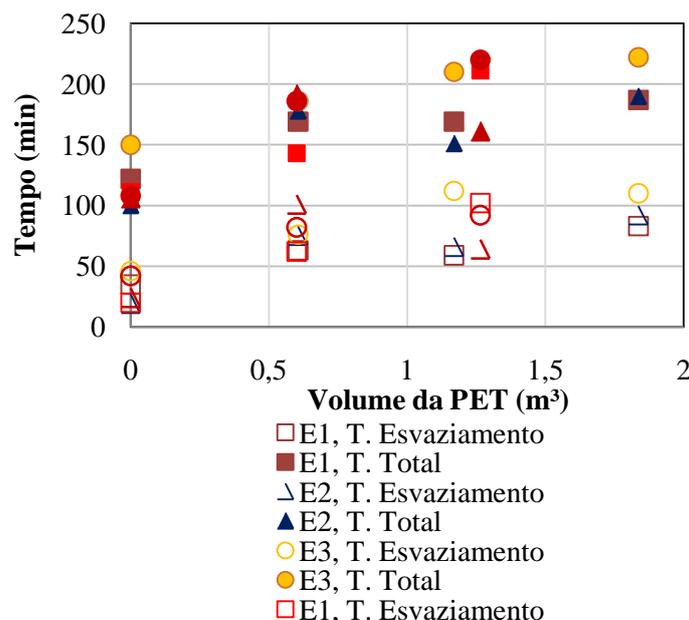


Figura 4.43– Sensor de nível: Profundidade x Tempo: a) 2ª etapa (Dez/2010); b) 3ª etapa (Fev/2011); e c) 4ª etapa (Jul/2011).

A Figura 4.43 mostra ainda que, quanto ao período no qual foram executados os ensaios de infiltração, os tempos tanto de esvaziamento como total, ou seja, o enchimento e o esvaziamento, foram maiores para o mês de fevereiro. Entre agosto e dezembro de 2010 não se registrou tendência clara de alteração na capacidade de infiltração. Cabe destacar que os dados de umidade do solo referentes aos ensaios de infiltração mostram que até a profundidade da trincheira as umidades encontradas para o perfil de solo eram em 27/11/2010 não muito superiores às obtidas no mês de agosto. Já as obtidas em janeiro e fevereiro foram bem superiores as de agosto e de dezembro. Portanto, os resultados obtidos nas trincheiras confirmam a tendência de o solo apresentar redução na capacidade de infiltração com o aumento da umidade natural e por consequência redução da sucção matricial atuante no solo.

Da análise desses ensaios, verifica-se que o uso das garrafas Pets cortadas/furadas/acopladas permite ampliar a capacidade de armazenamento da trincheira gerando certo retardamento no processo de infiltração. Esse retardamento reflete menor energia de fluxo e pode ser interessante nos casos onde ocorre risco de erosão interna.

Na quarta etapa de ensaios de enchimento, foram testadas apenas as trincheiras 3, 5 e 7; pois, nesta etapa, realizaram-se ensaios de enchimento juntamente com provas de carga nas trincheiras, o que inviabilizaria tecnicamente o enchimento das demais no tempo disponível para a realização dos ensaios. Essas foram as escolhidas, pois apresentam preenchimentos diferenciados, uma com garrafas cortada/acoplada/furadas (T3), outra com garrafas Pet inteiras (T5) e a última com Pet amassada (T7). Os ensaios foram realizados após a execução de provas de carga sobre a trincheira e em sua lateral a 1,5 e 2 m de distância. As provas de carga foram realizadas utilizando uma placa de 30 cm de diâmetro. Considerando-se o diâmetro da placa e a distância da trincheira, pode-se admitir que a prova de carga não interferiu no comportamento das trincheiras quanto à infiltração. A prova de carga sobre a trincheira pode eventualmente ter afetado um pouco o arranjo interno do enchimento das trincheiras.

No ensaio realizado de forma acumulada, após o enchimento convencional com caixas d'água, realizou-se um enchimento direto do caminhão pipa (Figuras 4.44 e 4.45), pode-se destacar que quanto maior a vazão de abastecimento, maiores serão o tempo e o volume acumulado dentro das trincheiras.

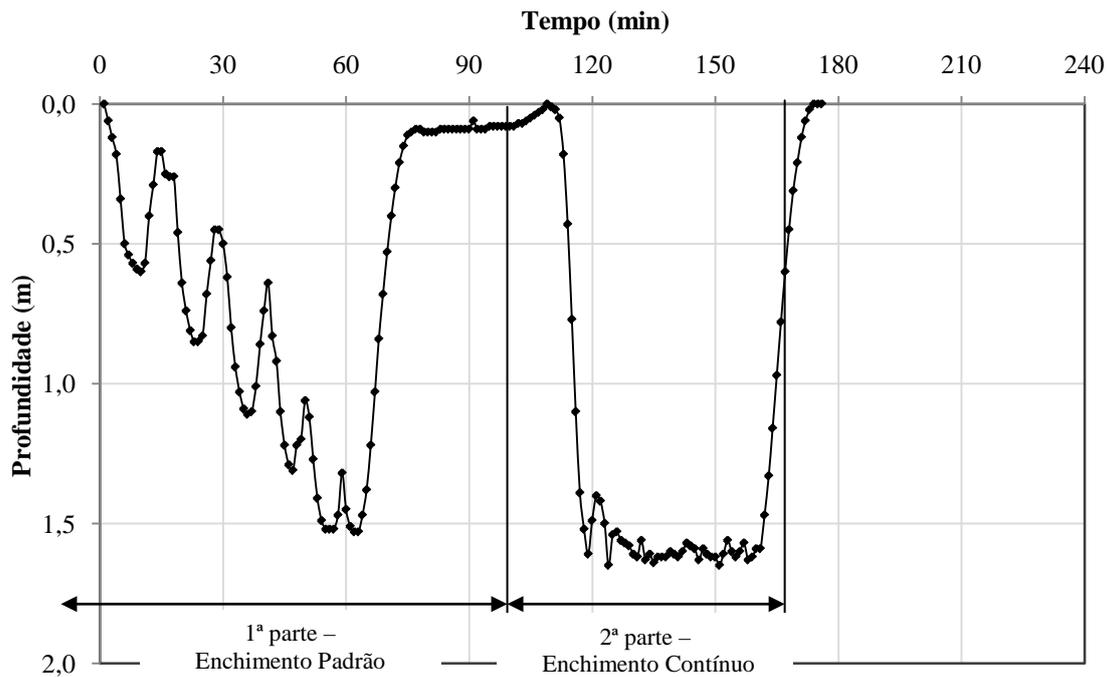


Figura 4.44 – Sensor de nível: Profundidade x Tempo, ensaio contínuo da trincheira 5.

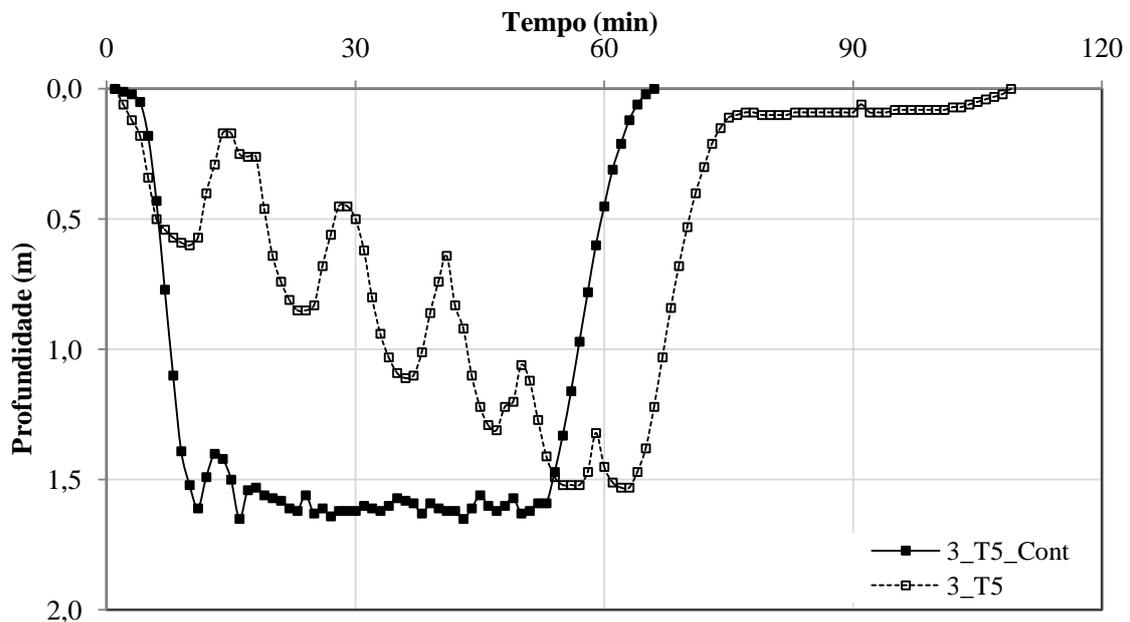


Figura 4.45 – Sensor de nível: Profundidade x Tempo, ensaio contínuo da trincheira 5, partes sobrepostas.

Observa-se que, com o mesmo volume sendo depositado com uma vazão menor, ele não consegue preencher na totalidade o volume da trincheira. Embora o tempo total seja maior

para esse caso, perceberam-se curvas de rebaixamento paralelas, ou seja, com mesma taxa de infiltração nos dois casos.

#### 4.6.2- RESULTADOS DOS TENSÍOMETROS

Concomitante ao enchimento, realizou-se o monitoramento da sucção em pontos espaçados da trincheira e em profundidades distintas conforme a configuração apresentada no capítulo 3, Figura 3.29. Na realização desse monitoramento, utilizaram-se cinco tensiômetros elétricos e 3 ou 2 tensiômetros com vacuômetro segundo a trincheira. Os tensiômetros elétricos por meio de um *datallogger* e um sistema de armazenamento de dados realizavam leituras a cada 15 segundos e nos tensiômetros com vacuômetro foram realizadas leituras em intervalos que iam de 10 até 30 minutos, depois se espaçando para intervalos de horas.

Esta configuração teve como objetivo obter valores de sucção, apontando o avanço da frente de saturação com a profundidade a partir do início do enchimento da trincheira. Nas Figuras 4.46 e 4.47, são apresentados os resultados obtidos no primeiro ensaio de enchimento realizado nas trincheiras T1 e T2. Os demais resultados são apresentados no Anexo B. Cabe destacar que, para a trincheira 1, como houve problema no sistema de aquisição de dados dos tensiômetros, os resultados constantes da Figura 4.46 se referem à repetição do ensaio, após concluídos os ensaios nas demais trincheiras, o que explica os menores valores de sucção registrados.

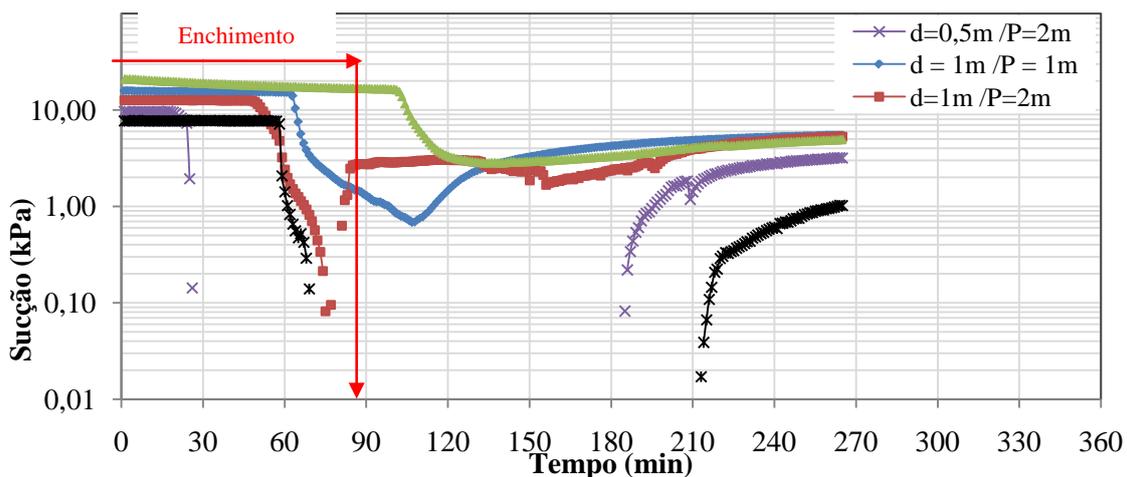


Figura 4.46- Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do primeiro ensaio de enchimento Trincheira 1 (23/08/10).

Legenda: d – distância da trincheira e; P – profundidade.

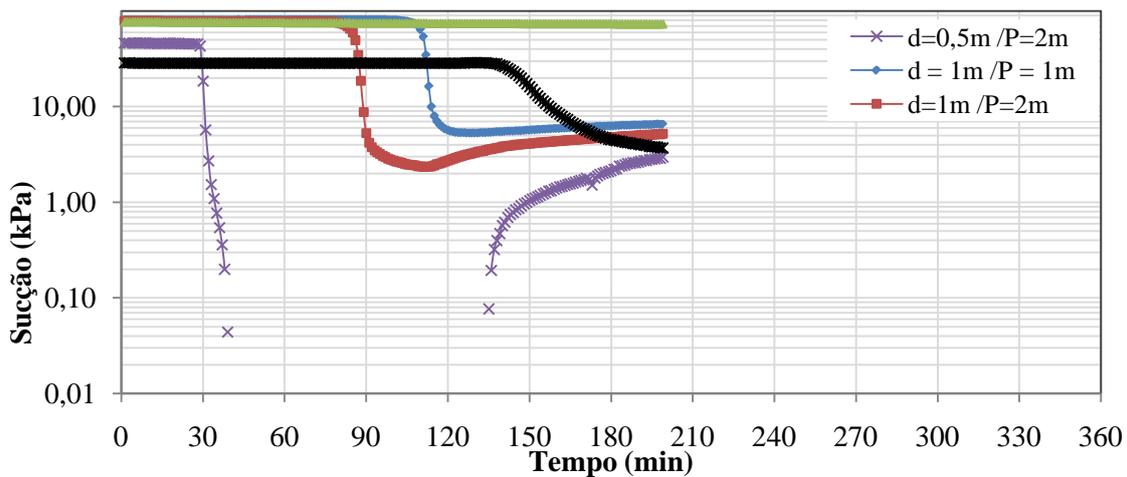


Figura 4.47 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do primeiro ensaio de enchimento Trincheira 2 (22/08/10).

Na busca de entender o comportamento do perfil de solo diante da infiltração e a própria influência da sucção inicial na infiltração, plotaram-se, na Figura 4.48, os resultados comparativos entre as trincheiras 1 (T1) e 2 (T2), lembrando que as medidas na trincheira 1 ocorreram logo após a realização de um primeiro ensaio de infiltração. Nos resultados mostrados na Figura 4.48a, verificou-se que a velocidade de fluxo foi maior na trincheira 1, onde predominava menores valores de sucção (Figura 4.48b). Esse comportamento parece contrariar até o presente colocado de que maiores valores de sucção acelerariam o processo de infiltração. No entanto, dois aspectos devem ser considerados: o primeiro se refere ao fato de que é provável que as pressões na fase ar oriundas do ensaio realizado alguns dias antes devem ter se dissipado, o outro é o fato de que a sucção inicial na trincheira 1 encontrava-se muito próxima à sucção que marca os macroporos, o que daria maior facilidade de percolação às moléculas de água. É preciso lembrar, ainda, que sucções mais elevadas indicam umidade e graus de saturação inferiores, isso conduz a maior capacidade de armazenamento de água, ou seja, a maior rapidez com que as sucções caíram na trincheira 1 não correspondem necessariamente ao fato de ter infiltrado maior quantidade de água na trincheira 2 no mesmo intervalo de tempo.

A linearidade da distribuição dos resultados mostrados nas Figuras 4.48b, ao se variar a distância da trincheira, e 4.48c, ao se variar a profundidade, indica que, durante a realização da repetição do ensaio na trincheira 1, as sucções já se encontravam estabilizadas apontando para o fato das pressões na fase ar oriundas do primeiro ensaio já terem se dissipado. Já a

distribuição das sucções mostradas na Figura 4.48c apontam para o intervalo de profundidade entre 2 e 3m como limite da zona ativa na interação solo-atmosfera.

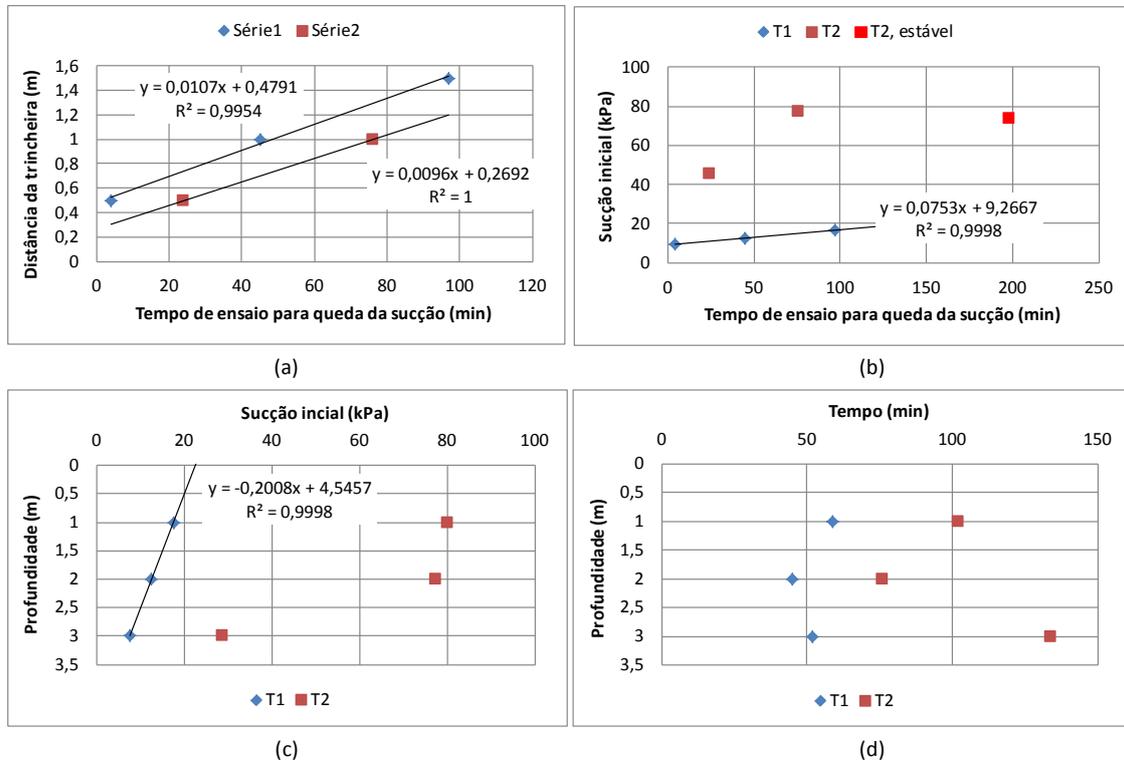


Figura 4.48 – a e b) resultados obtidos para a profundidade de 2m; c e d) resultados obtidos a distancia de 1m da trincheira em projeção horizontal.

Os resultados mostrados na Figura 4.48d obtidos para a distância de 1m em projeção horizontal da trincheira indicam, ao se comparar as profundidade de 1 e 2m, que a infiltração, como esperado, dependerá, além da sucção presente no solo, da coluna de água no interior da trincheira, ou seja, quanto maior a coluna de água menor é o tempo de infiltração, pois, à semelhança da sucção, a maior carga hidráulica amplia o gradiente hidráulico.

As Figuras 4.49, 4.50 e 4.51 ilustram os resultados obtidos na segunda etapa de ensaio para as trincheiras 1, 2 e 3, respectivamente. Os demais resultados encontram-se apresentados no Anexo B. O conjunto de resultados apontam para menores valores de sucção se comparados aos registrados para as trincheiras 2 a 7 da primeira etapa. Cabe destacar que, para a trincheira 6, as sucções iniciais a 1m de distância nas profundidades de 1m e 3m foram superiores aos valores registrados para as demais trincheiras nessa etapa de ensaio (Figura 4.54), podendo ser um indicativo da influência do tipo de trincheira sendo esta construída com tijolos em crivo.

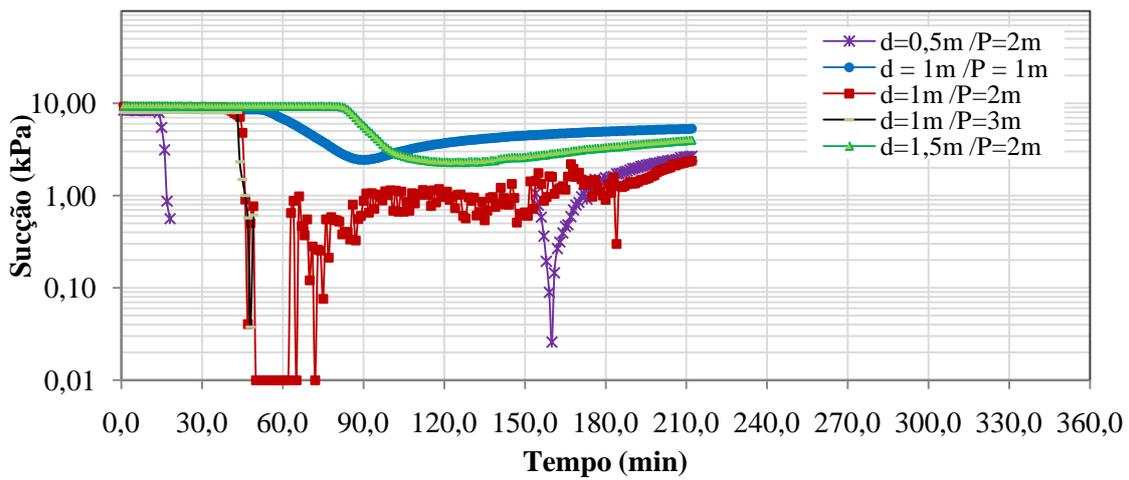


Figura 4.49 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do segundo ensaio de enchimento Trincheira 1.

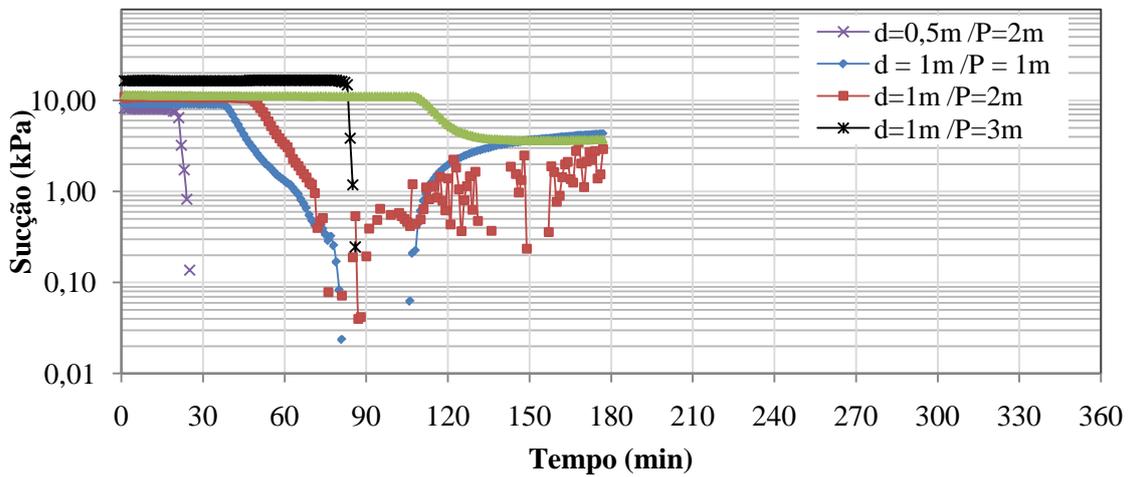


Figura 4.50 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do segundo ensaio de enchimento Trincheira 2.

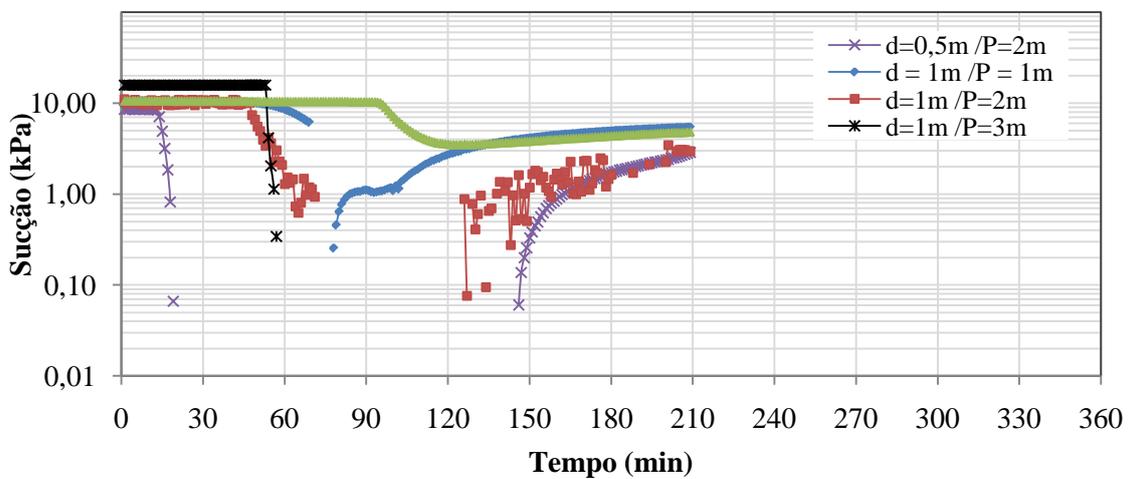


Figura 4.51 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do segundo ensaio de enchimento Trincheira 3.

As Figuras 4.52, 4.53 e 4.54 ilustram os resultados obtidos na terceira etapa para as trincheiras 1, 2 e 6 respectivamente. Os demais resultados da terceira e quarta etapa estão apresentados no Anexo B.

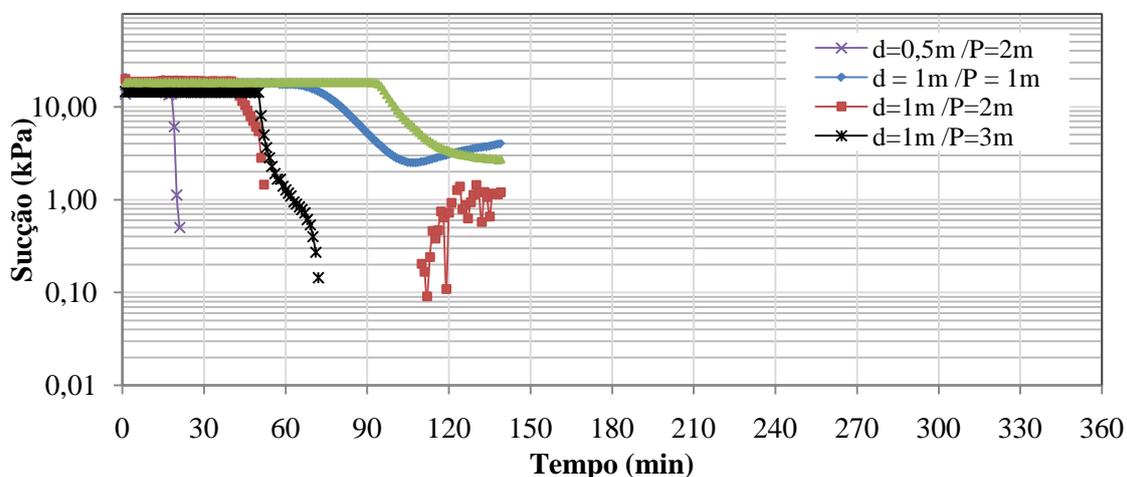


Figura 4.52 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do terceiro ensaio de enchimento Trincheira 1.

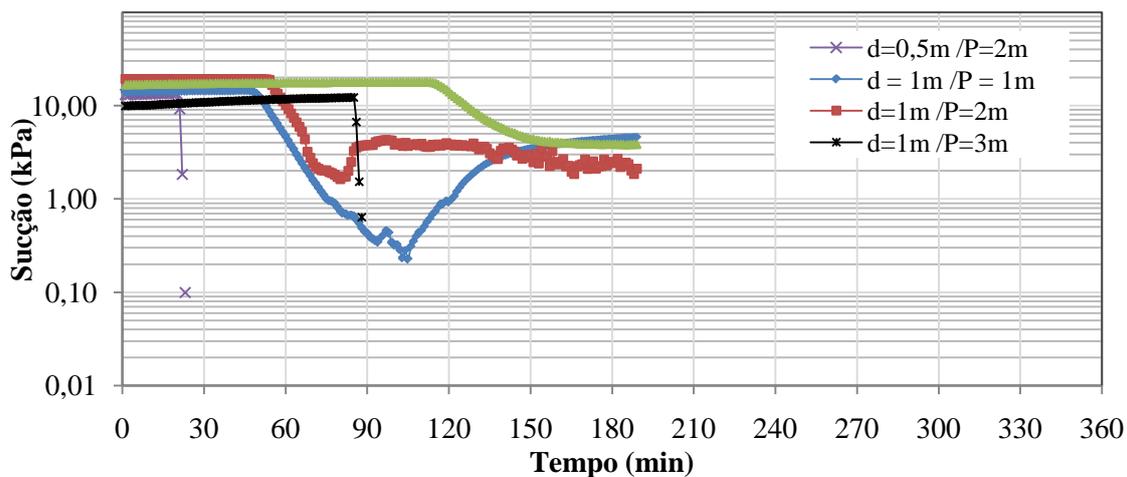


Figura 4.53 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do terceiro ensaio de enchimento Trincheira 2.

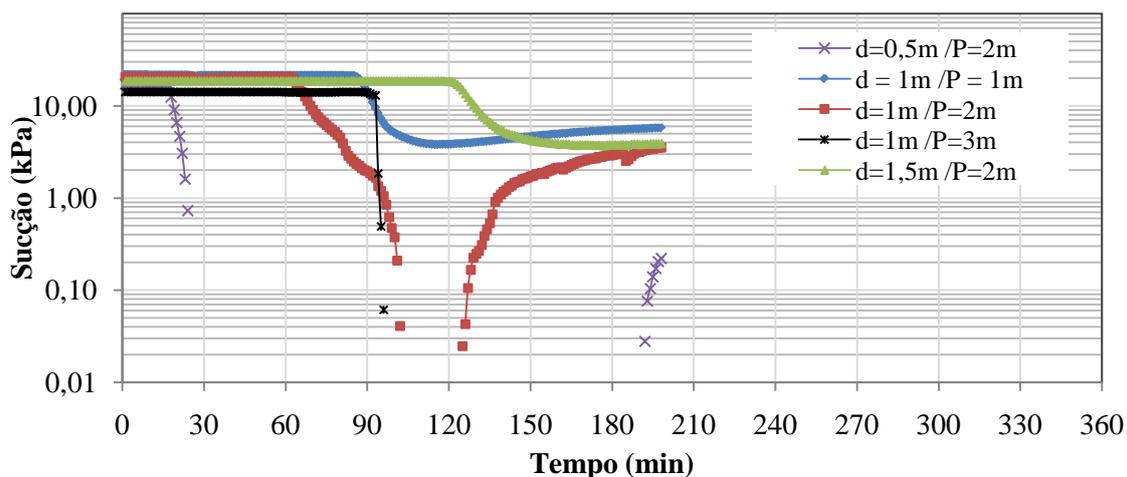
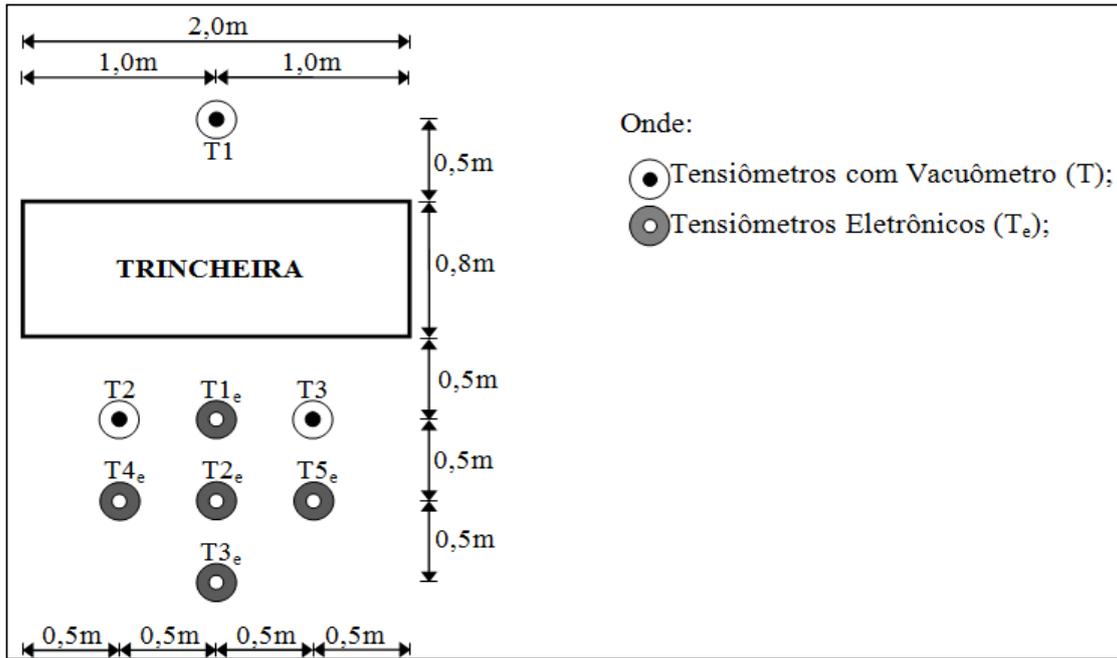


Figura 4.54– Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do terceiro ensaio de enchimento Trincheira 6.

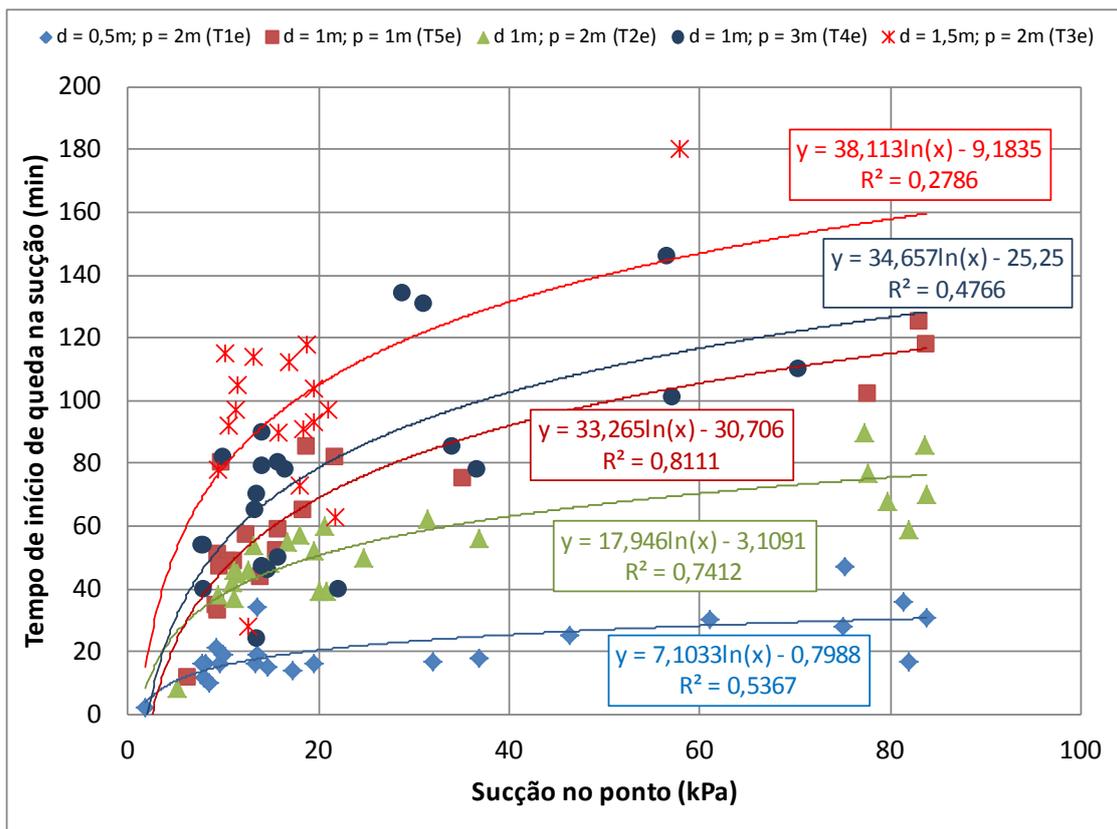
As tentativas de análise dos resultados medidos mostraram-se infrutíferas até que se buscou levar em conta não o tipo de trincheira, mas a localização dos pontos no maciço em relação a elas. Isso não quer dizer que o tipo de trincheira não tenha influência sobre o processo de infiltração, pois a significativa dispersão dos pontos aponta nessa direção. Como atuação da carga hidráulica oriunda da coluna de água na trincheira intervém no processo de infiltração, e parte dela é perdida segundo o seu preenchimento, concluiu-se que o seu modelo intervém na taxa de infiltração. Buscou-se ainda analisar os resultados considerando-se tão somente o seu afastamento da trincheira e depois a profundidade do ponto de medida da sucção no maciço, mas essa simplificação também se mostrou limitada, pois existe, nas trincheiras, ao contrário dos poços de infiltração que são circulares, o efeito dos cantos no fluxo e, portanto, na infiltração. Destaca-se que a influência da geometria do maciço no fluxo já havia sido pontuado por Camapum de Carvalho *et al.* (2007), ao analisarem a influência da forma do talude no rebaixamento do lençol freático, com consequências para a estabilidade de taludes. A análise que se segue foi então realizada considerando-se esses aspectos levantados, mas não apenas. Há que se considerar ainda a forma da curva característica de retenção de água seja considerando a sucção como função da umidade, seja como função do grau de saturação. Parece a mesma coisa, mas não o é. Enquanto a umidade representa sobretudo o papel químico-mineralógico do solo na sucção, o grau de saturação incorpora a este efeito a influência das características físicas do solo ao considerar em seu cálculo o índice de vazios. Devido a limitação no número de pontos instrumentados, grande parte das análises que se seguem devem ser vistas por enquanto em nível de hipótese.

A Figura 4.55a apresenta a distribuição em planta dos tensiômetros em relação às trincheiras e a Figura 4.55b apresenta o tempo necessário para que ocorra a queda no valor da sucção em função da sucção inicial atuante no ponto, considerando-se a localização dos tensiômetros. O melhor ajuste obtido para as distribuições dos pontos foi o logarítmico. Isso se explica por ser a sucção uma forma de energia que, como as demais, geralmente se associa bem ao logaritmo do tempo. Verificou-se na Figura 4.55b, considerando-se a distribuição dos pontos mostrada na Figura 4.55a, que quanto mais próximo for o ponto da trincheira (ponto distante 0,5m das trincheiras e localizado a 2m de profundidade) maior tende a ser o efeito da sucção na infiltração, pois sua contribuição em termos de energia para o gradiente hidráulico (sucção/distância) será maior. Por isso a curva ( $d=0,5m$ ,  $p=2m$ ) encontra-se abaixo da obtida para ( $d=1m$ ,  $p=2m$ ) e essa abaixo da obtida para ( $d=1,5m$ ,  $p=2m$ ). A análise da influência da localização do ponto em relação à lateral da trincheira foi dificultada pelo fato dos pontos situados a uma mesma distância das trincheiras se encontrarem em profundidades distintas. Também é de difícil análise a influência da profundidade, no entanto, ao se conservar os três pontos localizados a 1m de distância das trincheiras, verificou-se que os localizados no centro da lateral das trincheiras a 2m de profundidade foram os que receberam a água infiltrada em menor tempo. Isso se deu provavelmente por dois motivos: primeiro, devido à maior efetividade da energia proveniente da carga hidráulica no interior das trincheiras e segundo, porque o ponto localizado a dois metros encontrava-se no centro da lateral das trincheiras. Isso otimizou a atuação da sucção no fluxo. Diante destes aspectos levantados, torna-se possível estabelecer uma ideia inicial sobre a propagação da infiltração tanto na vertical (Figura 4.56a), como na horizontal (Figura 4.56b). Verticalmente, ele dependerá da carga hidráulica no interior da trincheira e da sucção presente no maciço (Figura 4.56a). Horizontalmente, ele tenderá a sofrer influência dos cantos da trincheira sendo o avanço da infiltração maior em sua parte central (Figura 4.56b).

Ainda sobre os resultados obtidos para o tempo de infiltração em função das sucções medidas, a Figura 4.55b mostra que a taxa de infiltração (maior tempo menor a taxa de infiltração) tende a cair rapidamente com o aumento da sucção para tensões inferiores a aproximadamente 10 kPa. A partir desta sucção, ela tende a cair menos com o aumento da sucção. Observando-se a Figura 4.4 percebeu-se que níveis de sucção inferiores a 10 kPa correspondem à zona de macroporos com tendência de continuidade da fase água.



(a)



(b)

Figura 4.55 – a) Distribuição dos tensiômetros; b) tempo de queda da sucção em função da sucção inicial segundo a localização do ponto.

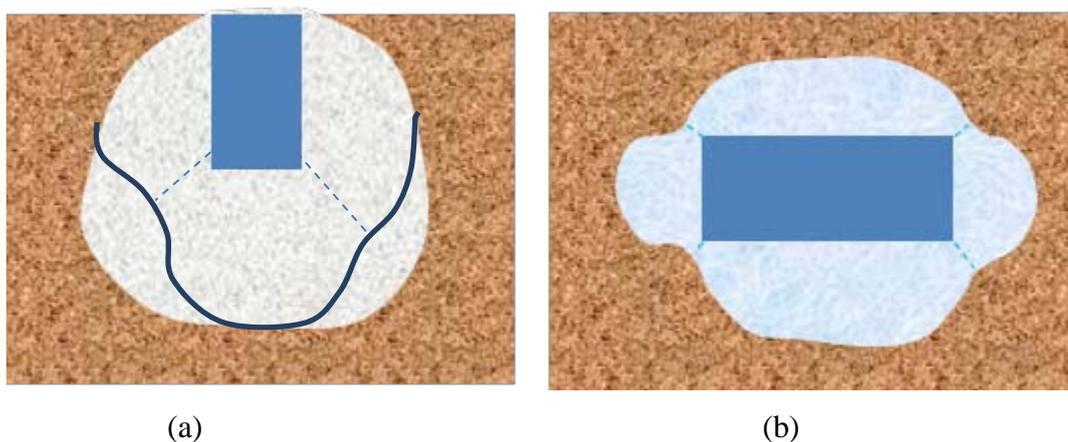


Figura 4.56 – a) corte com esboço do fluxo vertical a partir da trincheira; b) corte com esboço do fluxo horizontal a partir da trincheira.

Partindo-se do solo saturado, à medida que diminuiu a sucção, mais bolhas oclusas surgiram compondo o fluido, isso dificultou o fluxo e fez cair a taxa de infiltração. A partir de 10 kPa, ou até um pouco menos no caso perfil do solo estudado, a fase ar tende a ser contínua no interior dos macroporos fazendo com que a queda na taxa de infiltração diminua. No entanto, percebe-se que ela continuou a reduzir com o aumento da sucção. Essa análise parece contradizer os estudos realizados sobre a propagação de umidade a partir de um furo submetido a ensaio de infiltração. Cabe lembrar que, embora a taxa de infiltração esteja diminuindo com o aumento da sucção, o volume de água armazenado, exceto nos casos de bolha de ar oclusas, tende a se ampliar devido à maior disponibilidade de vazios a serem ocupados, isso resulta em maior efetividade em termos de volume infiltrado. Era esperado que, em certas situações, principalmente para sucções menores em que existe menor disponibilidade de vazios a serem ocupados pela água que essa tendência pudesse se inverter.

Portanto, das análises realizadas, depreende-se que o fenômeno da infiltração revela-se complexo e o seu entendimento poderá ser ampliado com o auxílio de simulações numéricas. Na Figura 4.57, apresenta-se uma simulação com valores de poropressão avaliando o perfil de umidade da trincheira. A Figura 4.58 apresenta medidas de grau de saturação no tempo até 4 horas, e a Figura 4.59 apresenta as medidas de poropressão em vista de planos horizontais.

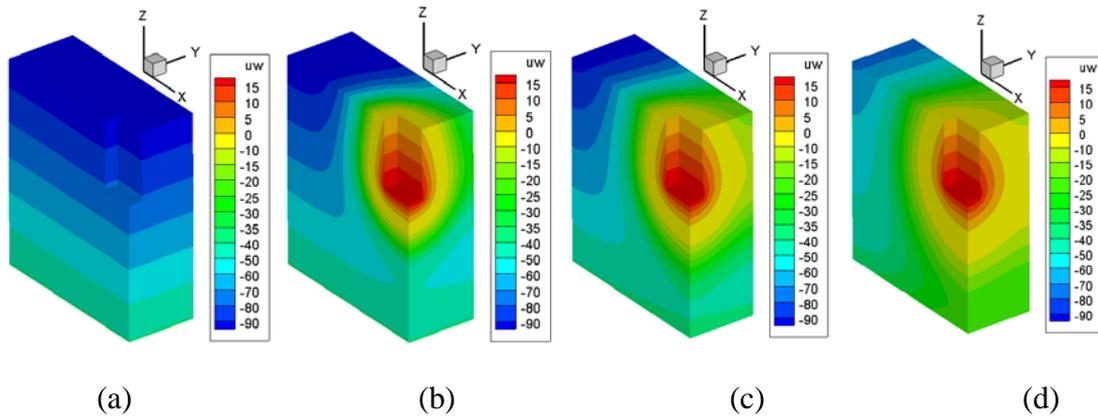


Figura 4.57 - Poropressão: a)  $t = 0$ ; b)  $t = 1$  hora; c)  $t = 2$  horas; d)  $t = 4$  horas. (Gitirana, 2012).

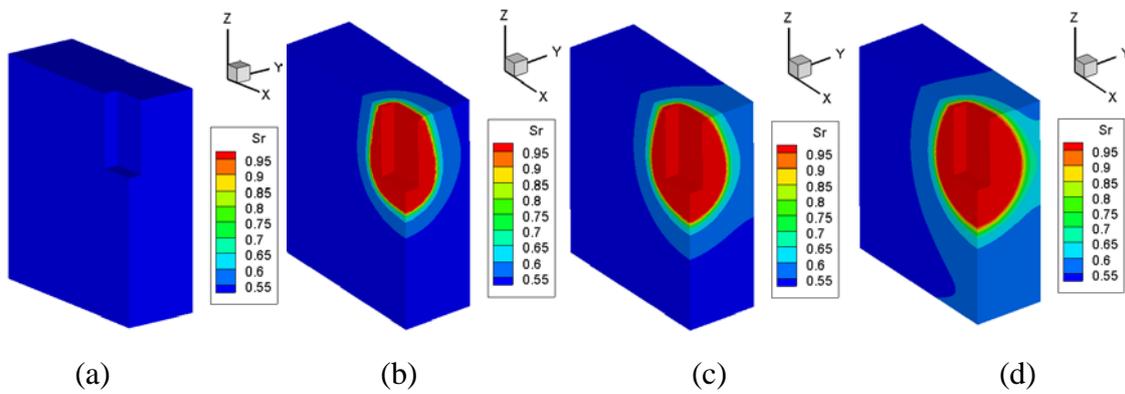


Figura 4.58 - Grau de saturação: a)  $t = 0$ ; b)  $t = 1$  hora; c)  $t = 2$  horas; d)  $t = 4$  horas .

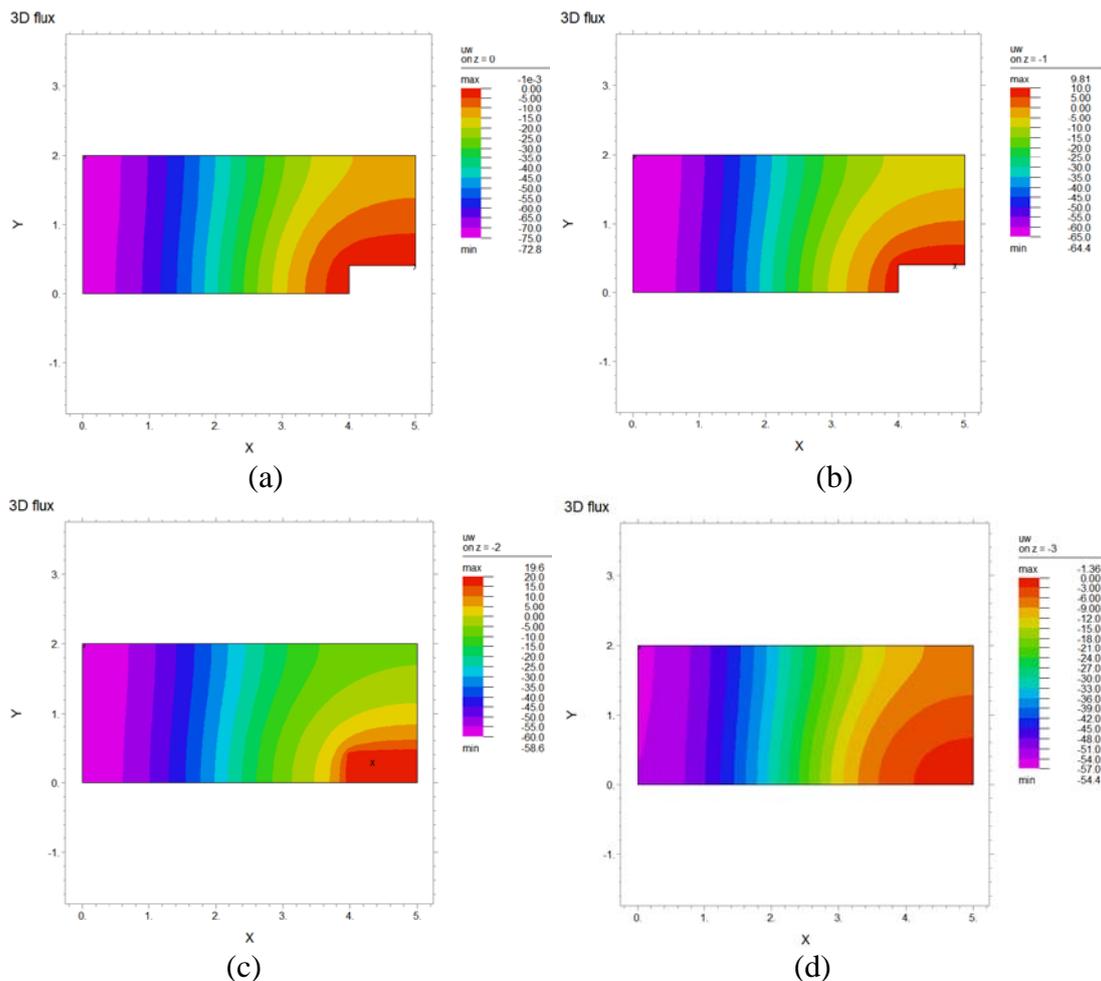


Figura 4.59 - Poropressão em planos horizontais para  $t=4$  horas: a)  $z = 0\text{m}$ ; b)  $z = -1\text{m}$ ; c)  $z = -2\text{m}$ ; d)  $z = -3\text{m}$ . (Gitirana, 2012).

As Figuras 4.60a (primeiro enchimento, trincheira 1) e 4.60b (primeiro enchimento, trincheira 2) ilustram os resultados obtidos nos tensiômetros com vacuômetro. Os demais resultados estão apresentados no Anexo C. A Figura 4.61 mostra que os resultados obtidos por meio desta técnica de controle da sucção apresentaram grande variabilidade. Adotando-se o mesmo modelo de correlação entre o tempo necessário para que ocorresse queda na sucção e a sucção inicial presente no solo, apenas os resultados oriundos dos instrumentos localizados no centro das trincheiras, a 0,8m de profundidade, apresentaram boa tendência de correlação. A aleatoriedade dos pontos registrada nos instrumentos localizados a 0,5m de profundidade e longo intervalo de tempo necessário para que ocorresse o desencadeamento da diminuição da sucção apontam para o fato de que os pontos foram atingidos apenas por fluxo capilar.

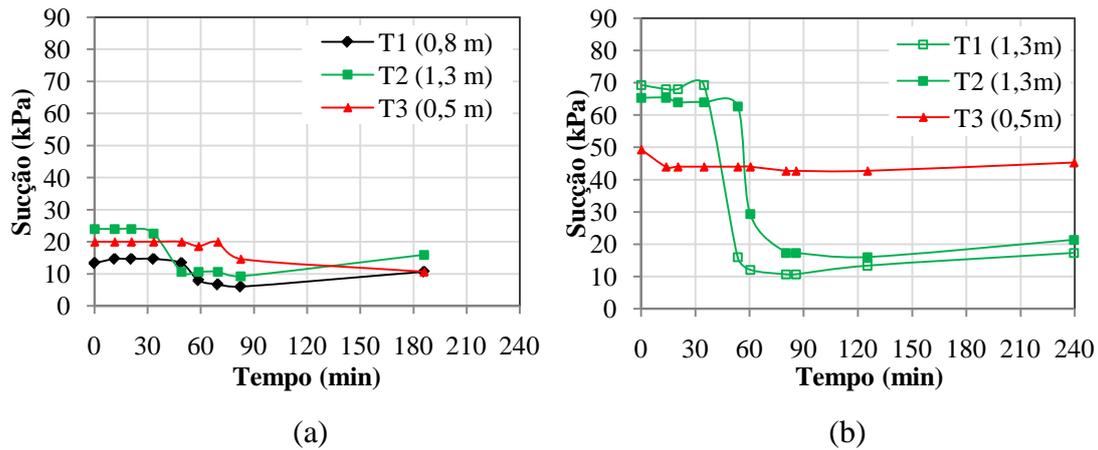


Figura 4.60 - Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, primeiro ensaio de enchimento a) Trincheira 1 e b) Trincheira 2.

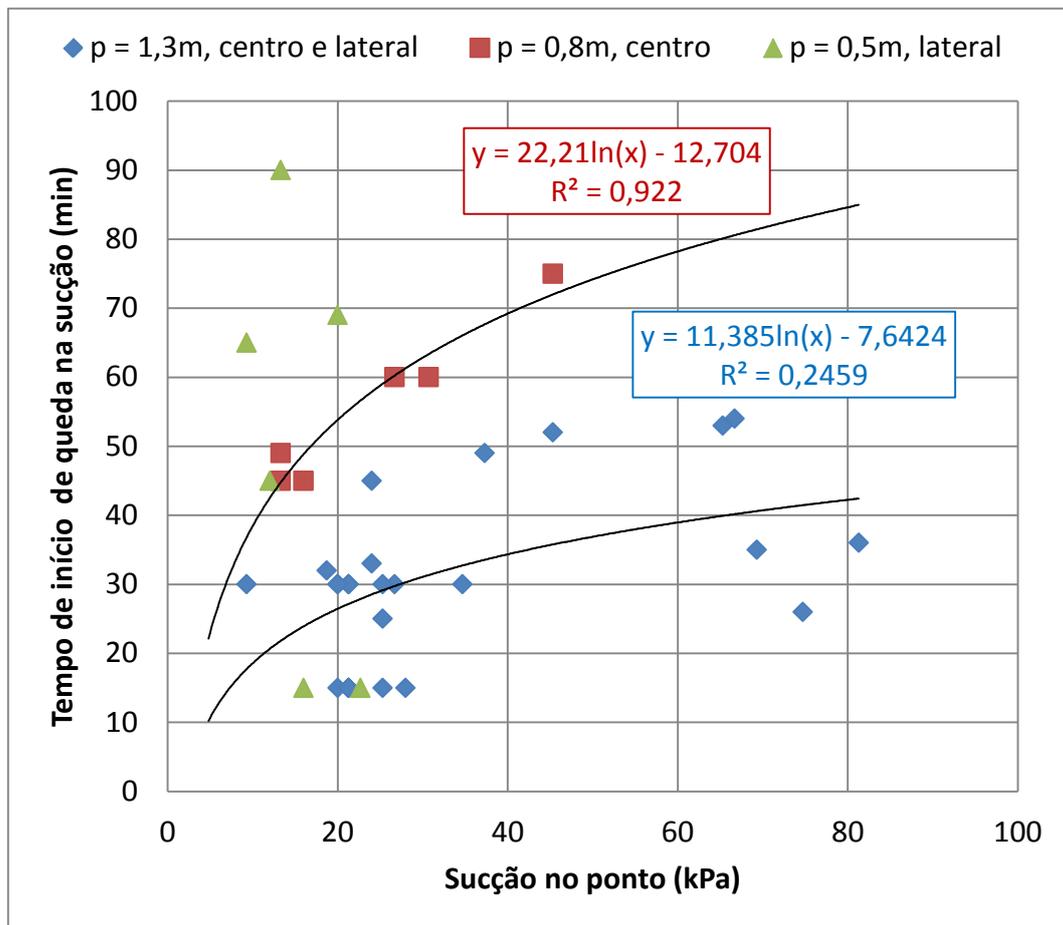


Figura 4.61 – Correlação dos tensiômetros vacuômetros.

#### 4.6.3- RESULTADOS DOS PIEZÔMETROS

Foram instalados piezômetros próximos às trincheiras, buscando monitorar o fluxo da água ao longo do tempo, durante a realização dos ensaios de infiltração a partir das trincheiras. Eles foram posicionados nos dois sentidos da trincheira, longitudinal e transversal, sendo colocados três piezômetros de cada lado no alinhamento dos cantos das trincheiras. Ortogonalmente ao lado maior, foram colocados os piezômetros P1, P2 e P3 e, ortogonalmente ao lado menor, os piezômetros P4, P5 e P6 (Figura 4.62). Em relação a cada um dos lados definidos como referência para o monitoramento, foi instalado o primeiro piezômetro a 50 cm da trincheira e os seguintes continuaram na mesma ortogonal com espaçamento de 50 cm entre eles. Todos os piezômetros foram instalados a aproximadamente 2,5m de profundidade. A partir do primeiro ensaio, o sinal de presença de água no início ou mesmo ao longo do ensaio sem que alterasse a leitura se referia à água residual no fundo do tubo. Destaca-se, ainda, que, em alguns casos, o sensor não funcionou.

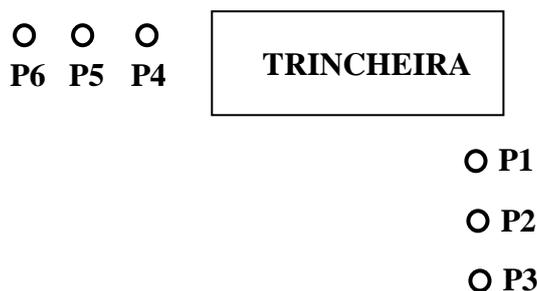


Figura 4.62 – Layout de distribuição dos piezômetros.

Em tempos definidos, foi inserido o sensor com sinal sonoro e luminoso nos piezômetros observando-se atentamente o sinal indicativo da presença de água. Nesse momento, anotou-se a profundidade apresentada pelo sensor e o tempo decorrido do início do enchimento.

A Figura 4.63 ilustra os resultados obtidos para um ponto de acúmulo de água, aqui denominado de “altura do nível d’água”, em função do tempo considerando-se as medidas efetuadas durante todos os ensaios realizados na trincheira 2. Os demais resultados estão apresentados no Anexo D. É importante destacar, nestas figuras, o fato do ponto de acúmulo de água junto ao lado maior da trincheira ser sistematicamente superior ao do lado menor

deixando claro a influência do canto (geometria) no fluxo, o que corrobora com o modelo proposto para a distribuição do fluxo.

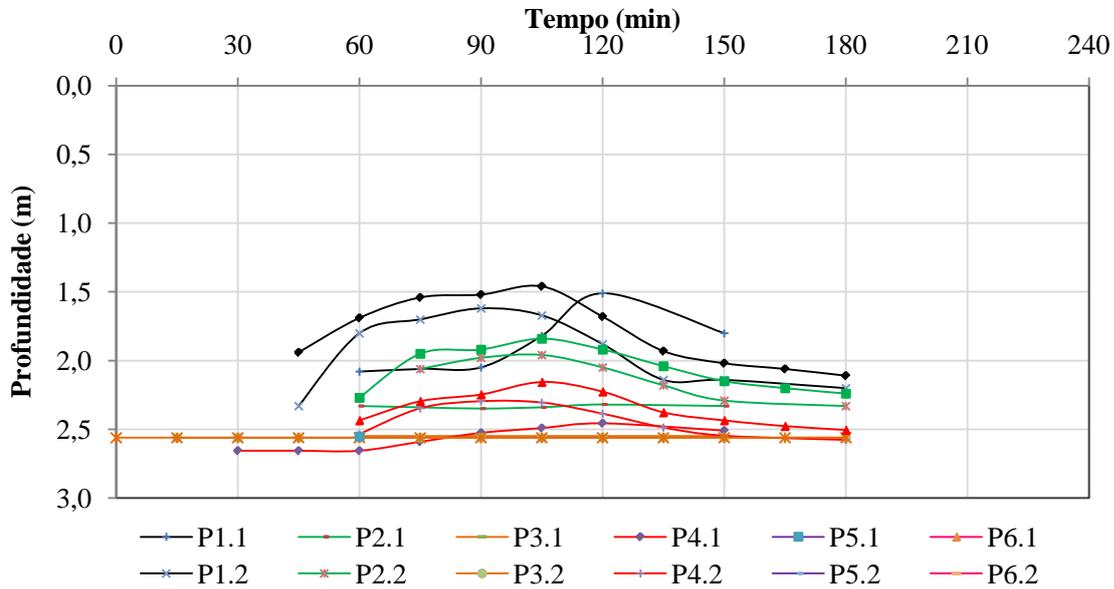


Figura 4.63 – Gráfico Piezômetro: Profundidade x Tempo, Trincheira 2.

Para maior facilidade de análise, separaram-se os resultados por trincheira e por etapa de ensaio conforme ilustram as Figuras 4.64 e 4.65 para os resultados da trincheira 2. Pode ser observado no conjunto de resultados que, devido ao fato do ponto de acúmulo de água no interior da trincheira não ser estacionário, o tempo de ocorrência do nível mais elevado em cada piezômetro tende ao aumentar à medida em que ele se afasta da trincheira.

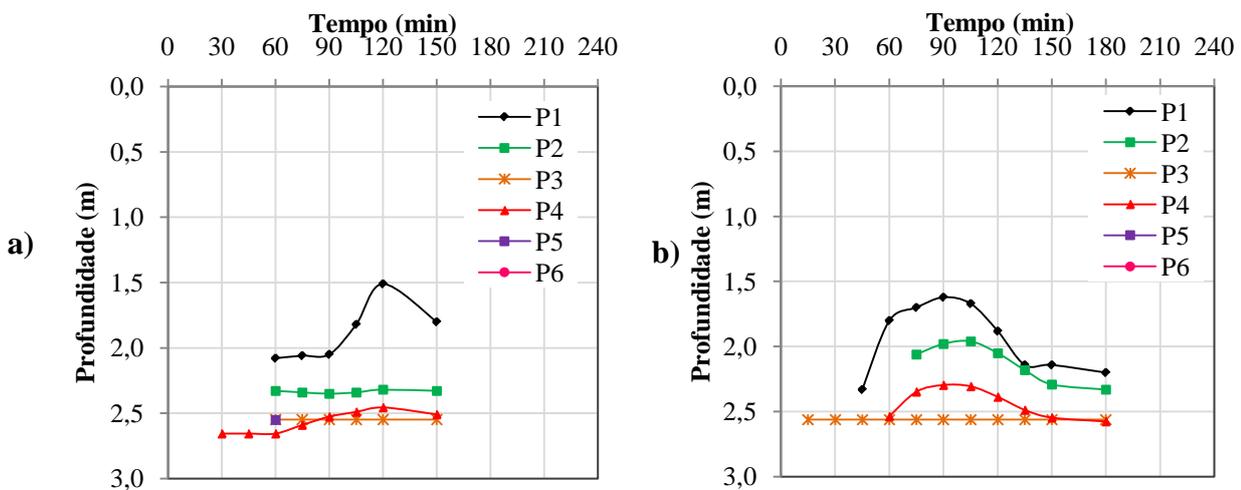


Figura 4.64 - Gráfico Piezômetro: Profundidade x Tempo, Trincheira 2: a) 1ª etapa e b) 2ª etapa de ensaios de enchimento.

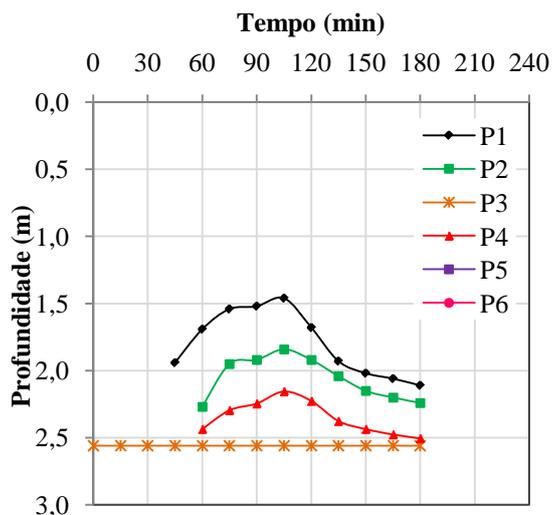


Figura 4.65 - Gráfico Piezômetro: Profundidade x Tempo, Trincheira 2, 3ª etapa de ensaios de enchimento.

A Figura 4.66 mostra que no enchimento sequencial da trincheira, no segundo ciclo o nível d'água foi superior ao alcançado no primeiro ciclo sendo atingido a uma menor velocidade. Essas observações tem duas nuances aplicadas e relevantes: a primeira que, durante as precipitações intercaladas com ciclos de enchimento das trincheiras, ocorre tendência a elevação do ponto de acúmulo de água em função das reincidências de chuva; e a segunda é que o estado de hidratação ou nível d'água máximo tende a se manter por maior intervalo de tempo. Ambas as constatações aplicadas ao caso das trincheiras podem ser estendidas para análises como as de estabilidade de encostas.

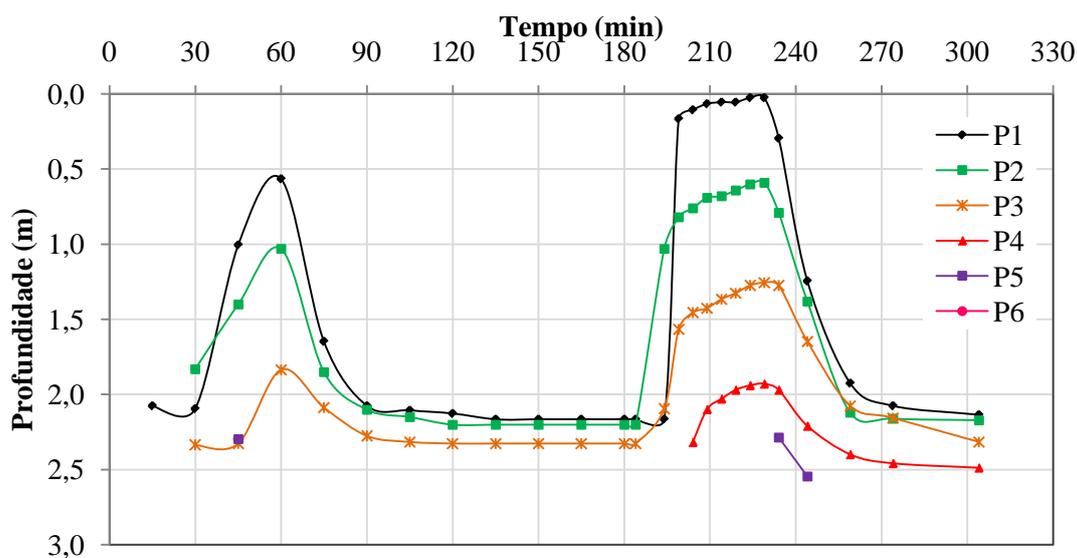


Figura 4.66 – Gráfico Piezômetro: Profundidade x Tempo, ensaio de enchimento Trincheira 5 – contínuo completo.

#### 4.6.4- RESULTADOS DOS PERFIS DE UMIDADE

Como forma de monitorar a umidade do solo próximo as trincheiras antes e após a infiltração, realizaram-se coletas de amostras de solo a cada 0,5m a partir da superfície até 3m de profundidade, a uma distância de 0,5m da borda da trincheira. As coletas foram realizadas utilizando um trado manual com 0,05m diâmetro e as umidades determinadas em laboratório.

A Figura 4.67, obtida para a primeira etapa de ensaios, ilustra os resultados obtidos para os perfis de umidade. A apresentação conjunta dos resultados obtidos antes e depois dos ensaios de infiltração para as demais etapas estão apresentados no Anexo E.

Na primeira etapa de ensaio, realizada no mês de agosto de 2010, verificou-se, Figura 4.68, que as umidades antes e após a infiltração apresentaram valores próximos até 1m de profundidade passando a se distanciarem a partir daí. Na segunda etapa, realizada no início de dezembro de 2010, os pontos obtidos após o ensaio referentes às trincheiras 2, 4 e 5 já se afastavam dos demais a partir da profundidade de 0,5 m. Na terceira etapa, realizada no mês de fevereiro, essa tendência foi verificada para todas as trincheiras. Esse conjunto de resultados revelou como esperado, que a capacidade de armazenamento aumenta nos períodos de seca, nos quais predominam menores teores de umidade.

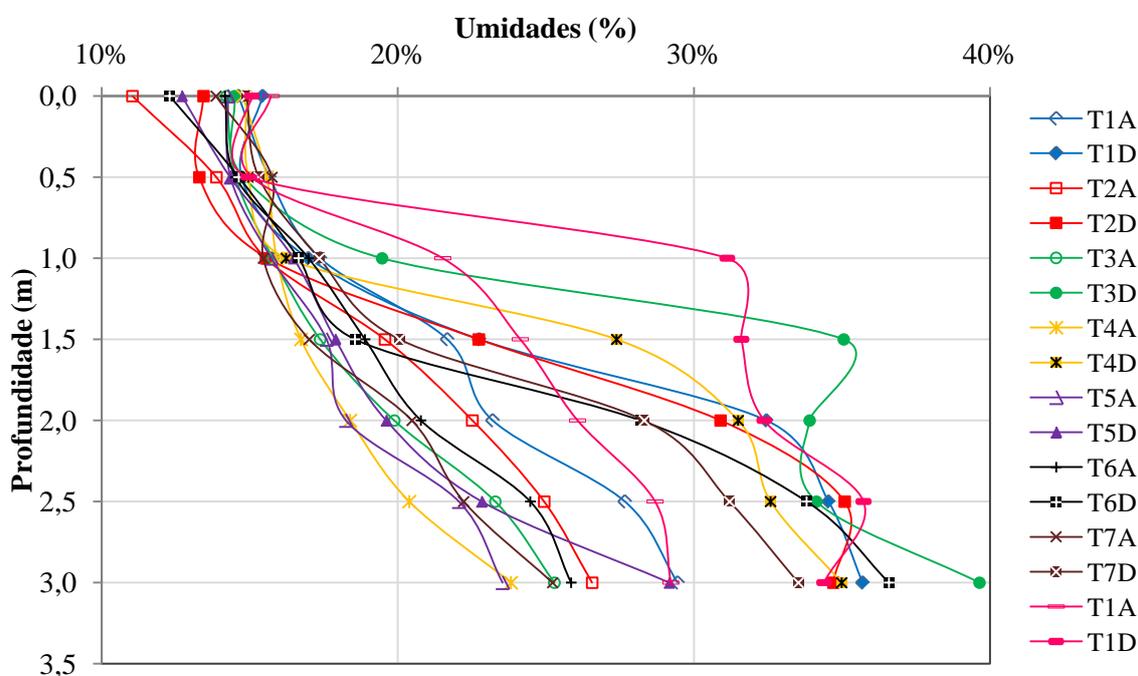


Figura 4.67 – Umidade antes e depois do ensaio, trincheiras 1 a 7 – 1º Ensaio.

Para melhor análise dos resultados, eles foram divididos em antes da infiltração (Figuras 4.68a, 4.69a, 4.70a) e após ela ter ocorrido (Figuras 4.68b, 4.69b e 4.70b). As análises dos conjuntos de perfis de umidades apontam para a heterogeneidade do maciço, apesar de sua aparente homogeneidade (cor, textura) até a profundidade ensaiada (3m). Antes e após os ensaios de infiltração, as variações de umidade em uma mesma cota chegaram a atingir 6% e até mais em pontos isolados. As variações de umidade, antes dos ensaios de infiltração de um perfil para outro, apontam para variações químico-mineralógicas e estruturais (principalmente porosidade) do local de uma trincheira para o de outra com prováveis reflexos na curva característica de retenção de água e na própria capacidade de infiltração. Já as diferenças entre os perfis de umidade, após os ensaios de infiltração do local de uma trincheira para o de outra, considerando-se as zonas abaixo dos níveis d'água medidos, apontam para variações de porosidade. Diante desses aspectos, tornam-se aceitáveis as dispersões nos resultados e aumenta a credibilidade nas tendências verificadas.

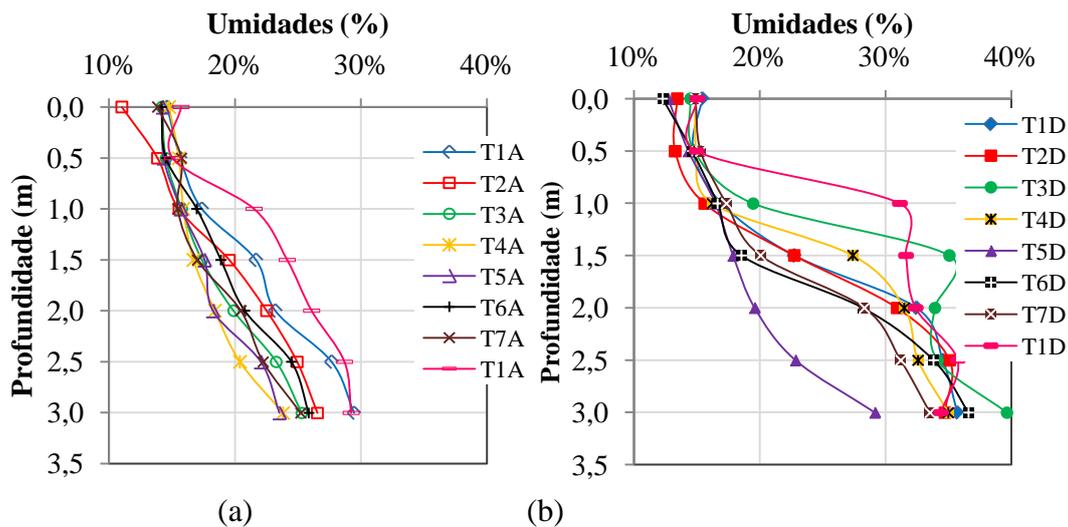


Figura 4.68 – Umidade: a) antes e b) depois do ensaio, trincheiras 1 a 7 – 1º Ensaio.

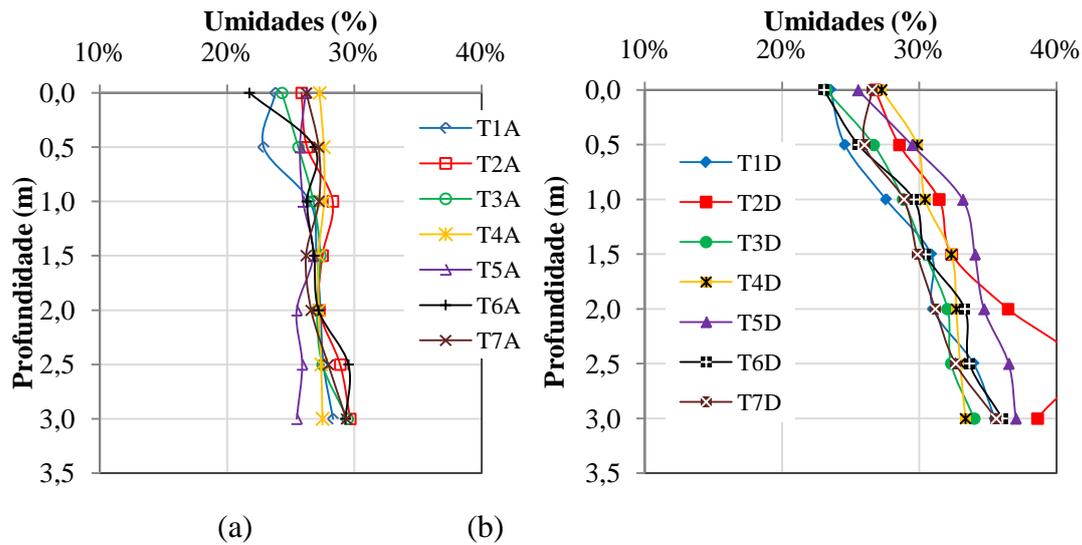


Figura 4.69 – Umidade:a) antes e b) depois do ensaio, trincheiras 1 a 7 – 2º Ensaio.

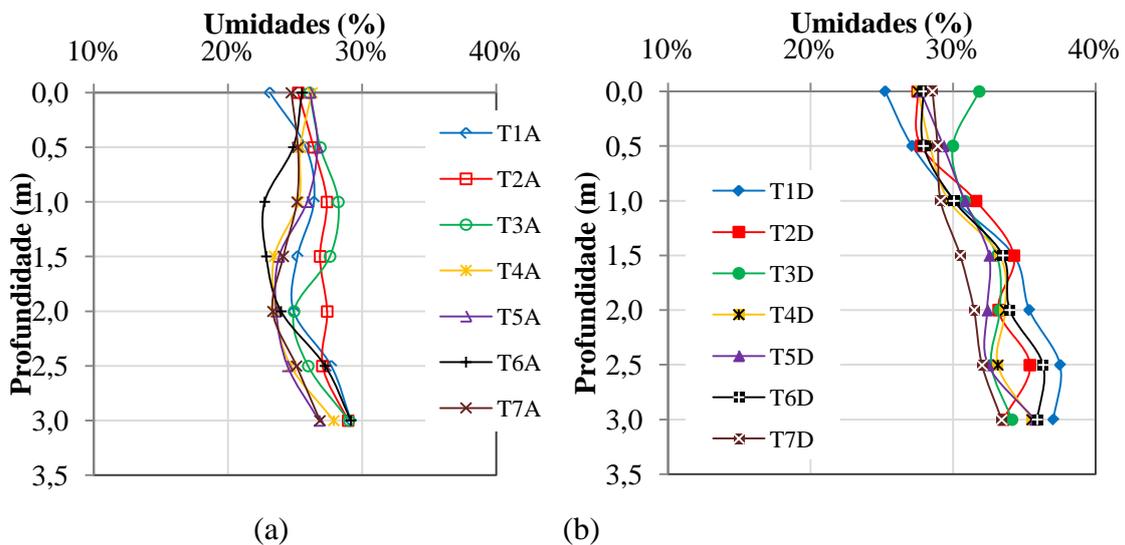


Figura 4.70 – Umidade:a) antes e b) depois do ensaio, trincheiras 1 a 7 – 3º Ensaio.

A Figura 4.71 mostra que, ao se obter umidades no segundo de infiltração realizado na trincheira 5, durante a quarta etapa de ensaio maiores que as obtidas após o primeiro ciclo, a saturação do maciço não é completa ou se perde com certa rapidez ao se realizar uma infiltração. No tocante à finalidade e funcionalidade das trincheiras, isso é importante, pois permite admitir que os sistemas de infiltração guardam certa capacidade diante de precipitações sucessivas.

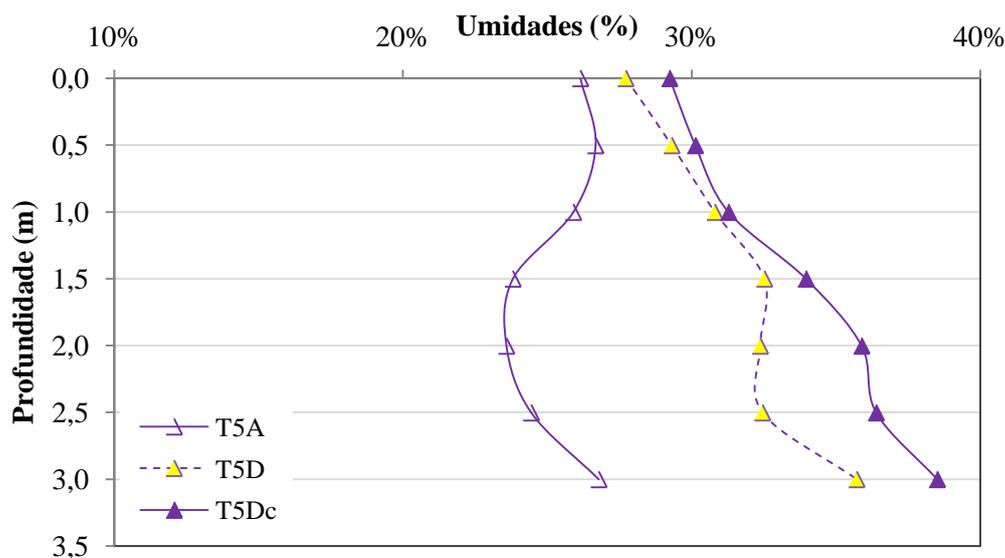


Figura 4.71 – Umidade antes, durante e depois do ensaio contínuo, trincheiras 5.

Relacionaram-se, na Figura 4.72a, 4.72b, 4.72c e 4.72d, as profundidades dos níveis d'água registrados nos piezômetros durante os ensaios de infiltração as médias das umidades obtidas antes da infiltração para as cotas situadas abaixo destes níveis (Figuras 4.72a e 4.72c) e para os perfis completos até a profundidade amostrada (3m) (Figuras 4.72b e 4.72d). À primeira vista, registra-se simplesmente uma grande dispersão de resultados, no entanto, com mais atenção, é possível estabelecer por meio de curvas esboçando o comportamento do solo (não se trata de curvas de correlação estabelecida) um divisor de tendências de comportamento. Esse divisor se encontra aproximadamente na umidade de 24% (Figuras 4.72c e 4.72d) quando se considera a umidade média do perfil e 26% quando se leva em conta apenas a umidade média dos pontos situados abaixo no nível d'água medido nos piezômetros (Figuras 4.72a e 4.72b). É importante ressaltar que a umidade de 26% encontra-se muito próxima a umidade de término da entrada de ar dos macroporos, que é de aproximadamente 28%. Considerando-se que as umidades nessas figuras correspondem a um primeiro ciclo de infiltração e que dele para o segundo foi registrado para a trincheira cinco uma diferença média no perfil igual a 2,1% pode ser entendido que esse divisor correspondente à umidade que separa os macroporos dos meso e microporos na curava característica. Portanto, é razoável admitir que, segundo esses resultados, se o solo se encontrar em umidades inferiores ao término de entrada de ar dos macroporos, o nível d'água em consequência da infiltração será tanto maior quanto menor for a sucção. Isso é esperado, pois maiores sucções correspondem a menores umidades e maiores capacidade de armazenamento. Quando se

adentra região de macroporos, a tendência se inverte, fato também justificável, pois sendo a sucção pequena e variando pouco com a umidade, o fluxo passa a depender de aspectos como as bolhas oclusas e menor umidade, mas elas existem e obstruem a drenagem favorecendo a elevação do nível d'água.

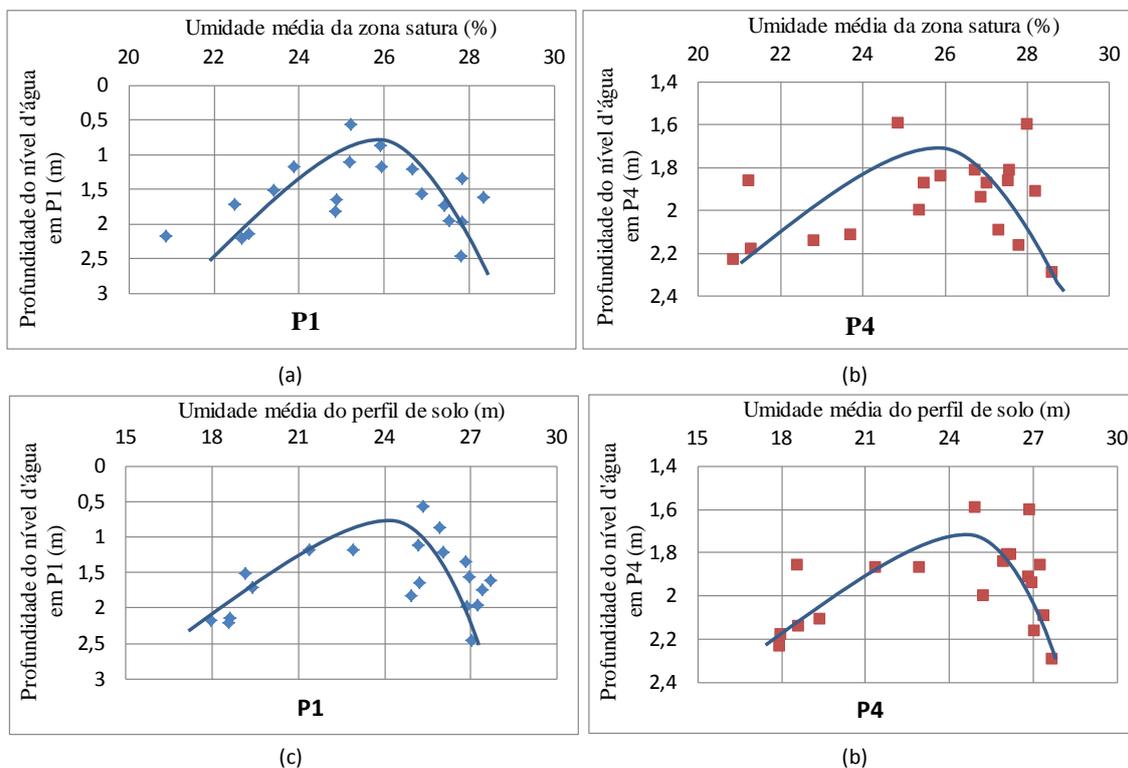


Figura 4.72 - a) Profundidade do nível d'água (NA) no piezômetro P1 em função da umidade média abaixo do NA antes dos ensaios de infiltração; b) Profundidade do NA no piezômetro P4 em função da umidade média abaixo do NA antes dos ensaios de infiltração ; c) Profundidade do NA no piezômetro P1 em função da umidade média do perfil antes dos ensaios de infiltração; d) Profundidade do NA no piezômetro P4 em função da umidade média do perfil antes dos ensaios de infiltração.

Esta análise de resultados aqui apresentada tem aplicação prática não só no caso de sistemas de infiltração, mas também no caso de estabilidade de encostas e inundações.

#### 4.6.5- RESULTADOS DA ANÁLISE DA ÁGUA

Buscando diminuir as variáveis nos ensaios de enchimento e evitar contaminação do lençol freático, realizou-se a caracterização química da água utilizada. Foram determinadas para

análise três procedências distintas: um córrego e, os outros dois locais de captação, poços artesianos de abastecimento.

Em relação aos resultados encontrados (Tabela 4.11), observou-se em todas as análises que eles apresentaram-se dentro dos valores recomendáveis para consumo. Mesmo que entre si apresentem variações, todos eles situaram-se dentro dos limites admissíveis não indicando riscos de contaminação nos locais de infiltração.

Tabela 4.11 - Análise da água utilizada nos ensaios de enchimento.

Parâmetros Analisados	Amostra	Amostra	Amostra	Valores de Referência	
	1	2	3	Mínimo Recomendável	Máximo Tolerável
	Poço Artesiano I	Córrego	Poço Artesiano II		
pH	6,46	6,31	6,88	5,5	12,0
Cor	2,11	2,02	3,02	0	30,0
Turbidez (FTU)	1,41	1,42	4,07	1,0	8,0
Condutividade ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	25,0	13,69	90,8	10,0	3000,0
Cloretos (mg/L)	27,23	27,23	27,23	10,0	600,0
Alcalinidade (mg/LCaCO <sub>3</sub> )	22,76	11,38	53,12	3,0	280,0
Oxigênio cons (mg/L)	6,31	4,47	6,51	0,2	15,0
Dureza mg/L (Ca,MgC)	126,53	8,16	40,82	4,0	500,0
TDS (mg/L)	42,1	32,19	79,7	30,0	1500,0
Ferro Total (mg/L)	0,65	0,51	2,23	0,3	3,0
Cálcio (mg/L)	45,76	3,27	14,71	0	75,0
Silício (mg/L)	6,58	6,79	6,67	-	-
Magnésio (mg/L)	2,97	0,99	0,99	0	50,0

#### 4.7- ENSAIOS DE ENCHIMENTO

A quarta e ultima etapa de ensaio de enchimento foi acompanhada de provas de cargas. As provas de cargas foram realizadas da seguinte forma: primeiramente realizaram-se provas de cargas no solo natural adjacente à trincheira a distancias estabelecidas da borda e no seu centro. Em seguida realizou-se o ensaio de enchimento. Por final realizaram-se novas provas de carga nos pontos anteriormente ensaiados. As trincheiras foram ensaiadas conforme a Tabela 4.11. Essa etapa foi realizada entre os dias 18/02/2011 e 22/02/2011. Embora esse período fosse menos crítico aos efeitos do aumento da saturação do solo, ele revelou-se a pior situação de capacidade de carga pela qual o solo passa ao longo do ano. Destaca-se que se optou por ensaiar as trincheiras 3, 5 e 7 por ser o uso de garrafas Pet o foco principal da pesquisa.

Tabela 4.12– Trincheiras submetidas à prova de carga.

Prova de Carga (antes)		Ensaio de enchimento	Prova de Carga (depois)	
Trincheira 3 (T3)	Solo (distância 2m)		Ensaio de enchimento	Solo (distância 2m)
	Trincheira (eixo)	Trincheira (eixo)		
Trincheira 5 (T5)	Solo (distância 1,5m)	Ensaio de enchimento	Solo (distância 1,5m)	
	Trincheira (eixo)		Trincheira (eixo)	
Trincheira 7 (T7)	Solo (distância 2m)	Ensaio de enchimento	Solo (distância 2m)	
	Trincheira (eixo)		Trincheira (eixo)	

As provas de cargas foram realizadas utilizando um conjunto formado por uma viga e blocos de concreto como sistemas de reação. Devido à capacidade do sistema de reação limitaram-se as provas de carga a 14,71 kN (1,5 tf).

Na Figura 4.73 a e b, estão apresentados os recalques oriundos das cargas aplicadas na trincheira 3 e no solo a 2m de distância da borda dela, respectivamente. As tensões

representadas, assim como nas demais figuras que se seguem, correspondem à carga aplicada dividida pela área da placa. Na Figura 4.73a, observou-se que a trincheira (preenchida com garrafas cortadas/acopladas/furadas), apresentou recalques máximos em torno de 12mm para uma carga de sollicitação de até 11,77 kN. Esse comportamento mostrou-se diferenciado da capacidade de suporte apresentada no item 4.5.2, em que o conjunto ensaiado de garrafas Pet cortadas/acopladas não apresentaram resistência às sollicitações superiores a 40 kPa, deformando-se gradualmente até seu esmagamento total.

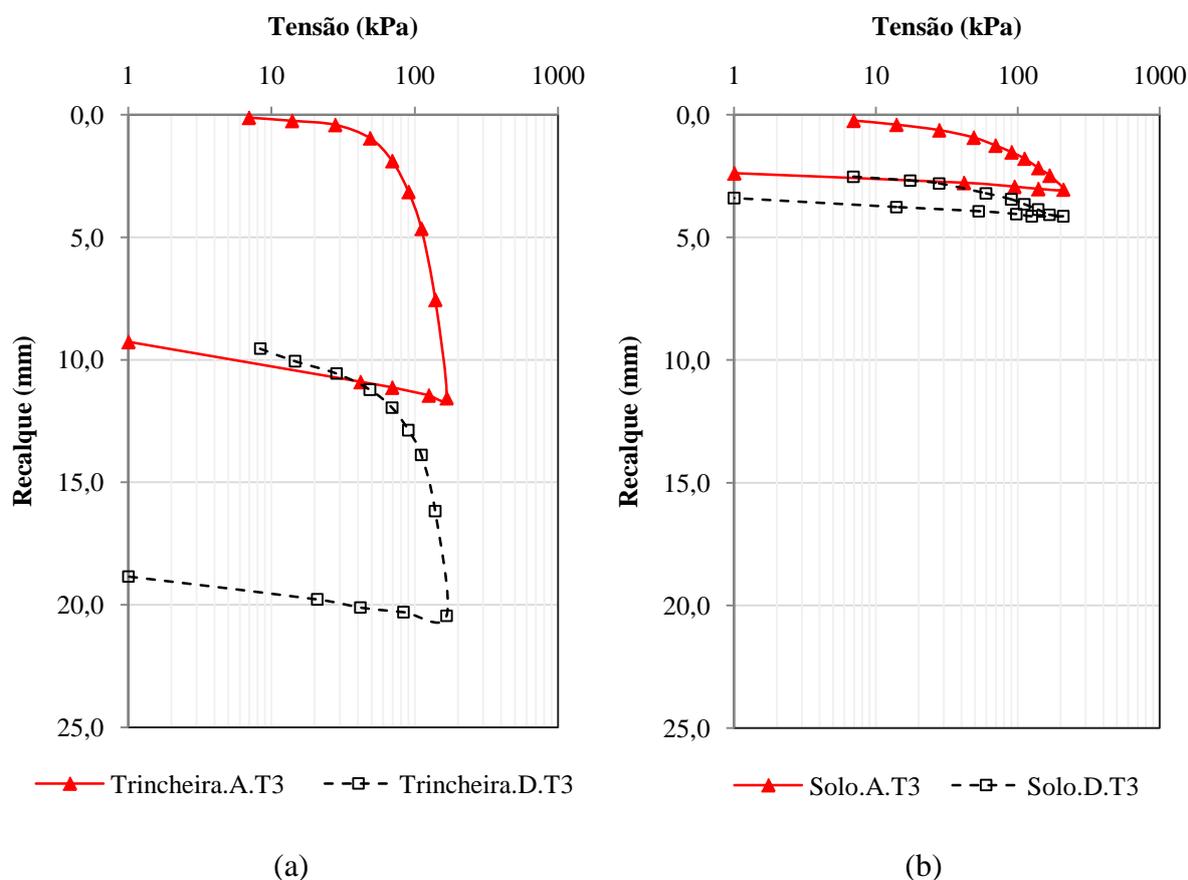


Figura 4.73 – Provas de carga no solo e no eixo da trincheira 3, antes e depois o ensaio de enchimento.

No caso da trincheira, pressupõe-se que sua maior capacidade de carga deve-se ao arranjo utilizado (brita+garrafas) fazendo sobressair à importância da camada de brita. Cabe destacar que essa contribuição da camada de brita dependerá de sua espessura e das dimensões da trincheira bem como da área sollicitada. Observou-se ainda que, no ensaio realizado em laboratório, as tensões atuavam diretamente sobre as garrafas Pet enquanto no campo, nessa trincheira, elas se encontravam a 44 cm do ponto de aplicação das cargas (0,10m de areia,

0,34m de brita, seguida de 1,20m de Pet). Considerando-se que, em laboratório, o diâmetro da placa era igual a 0,03m e a espessura da camada de garrafas de 0,45m e que, no campo, a placa tinha apenas 0,3m de diâmetro, percebe-se que as solicitações em laboratório sobre as garrafas Pet foram provavelmente mais significativas que em campo. Cabe destacar que a opção pela placa de 0,3m ocorreu em função da limitação da capacidade do sistema de reação e a fim de evitar que o bulbo de tensões atingisse de modo relevante as laterais da trincheira. Na comparação das curvas antes e depois do ensaio, não se observaram diferenças significativas nos resultados dos ensaios realizados no eixo da trincheira, ou seja, o enchimento com a água não afetou a estrutura quanto ao carregamento. O ganho de linearidade na parte inicial da curva, certamente, reflete o arranjo estrutural na camada de brita oriundo do carregamento antes do ensaio de infiltração. Sobre o comportamento do solo, é claro o ganho de rigidez do solo em consequência da realização da primeira prova de carga. Esse comportamento é frequente nos solos colapsíveis conforme o caso em estudo. Destaca-se, porém, que a ocorrência de recalques residuais significativos na segunda prova de carga aponta para a ocorrência de colapso estrutural adicional, provavelmente, em consequência do aumento do teor de umidade do solo, apesar de ser superficial o bulbo de tensões.

Na Figura 4.74 a e b estão apresentados os recalques oriundos das cargas aplicadas na trincheira 5 e no solo a 1,5m de distância da borda dela, respectivamente. Na Figura 4.74a, observou-se que a trincheira (preenchida com garrafas inteiras) apresentou recalques máximos em torno de 120mm para uma carga de solicitação de até 7,85kN. Nesse caso, como a espessura da camada de brita era aproximadamente igual a usada na trincheira 3, é possível admitir comparativamente que as garrafas Pet inteiras trabalharam se submetendo a grandes deformações.

O adensamento gerado no material de enchimento da trincheira, durante o ensaio realizado antes do ensaio de infiltração, proporcionou sua melhoria de comportamento, mas os recalque medidos ainda foram importantes superando ainda em seis vezes os recalque medidos no primeiro e no segundo ensaio sobre a trincheira 3. Portanto, em termos de capacidade de carga as garrafas Pet cortadas e acopladas representam melhor opção. Quanto ao comportamento das provas de carga sobre o solo cabem aqui as mesmas observações feitas para a trincheira 3, apesar dos recalques terem sido maiores naquele caso o que pode ser explicado pela maior colapsibilidade do perfil de solo da trincheira 3. Isso se comprova pelo maior recalque observado já na prova de carga antes do ensaio de inundação.

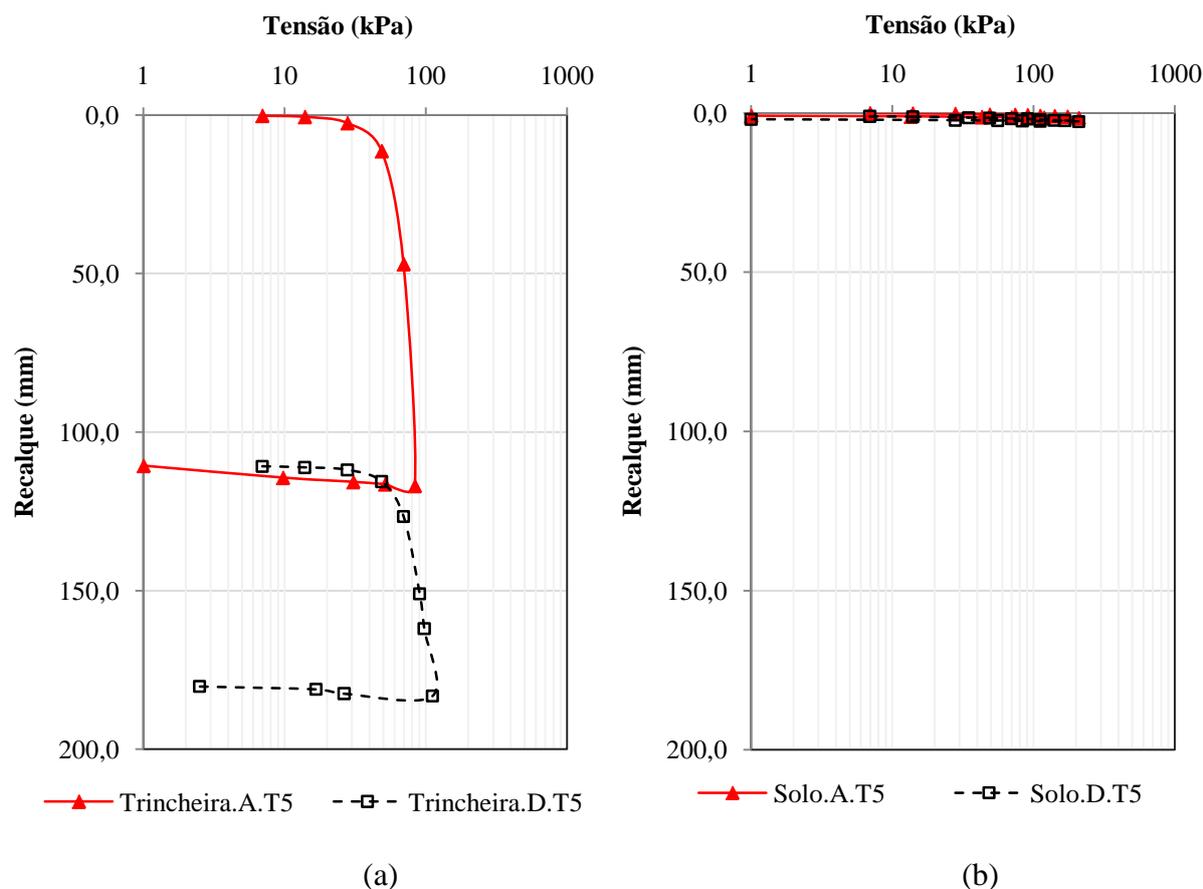


Figura 4.74 – Provas de carga no solo e no eixo da trincheira 5, antes e depois o ensaio de enchimento.

Na Figura 4.75a e b, estão apresentados os recalques oriundos das cargas aplicadas na trincheira 7 e no solo a 2m de distância da borda da mesma, respectivamente. Na Figura 4.75a, observou-se que a trincheira (preenchida com garrafas amassadas), apresentou recalques máximos em torno de 18mm para uma carga de solicitação de até 200kPa, em ambos os ensaios, antes e após a infiltração. Destaca-se, no entanto, que apesar da maior espessura da camada de brita sobrepondo-se as garrafas Pet amassadas (0,95m de brita e 0,10m de areia), os recalques aqui obtidos foram, para os mesmos níveis de tensão (166kPa), aproximadamente 10% superiores aos registrados para trincheira 3 contendo garrafas Pet cortadas e acopladas, tanto antes quanto após os ensaios de infiltração. Apesar de ser pequena a diferença, ela aponta para o melhor desempenho das garrafas Pet cortadas e acopladas.

Comparando as curvas de recalque dos ensaios realizados no solo (Figura 4.75b), observou-se comportamento semelhante aos obtidos para as demais trincheiras, assumindo neste caso, a curva cargarecalque um posição intermediária entre os ensaios realizados nas trincheiras 3 e 5.

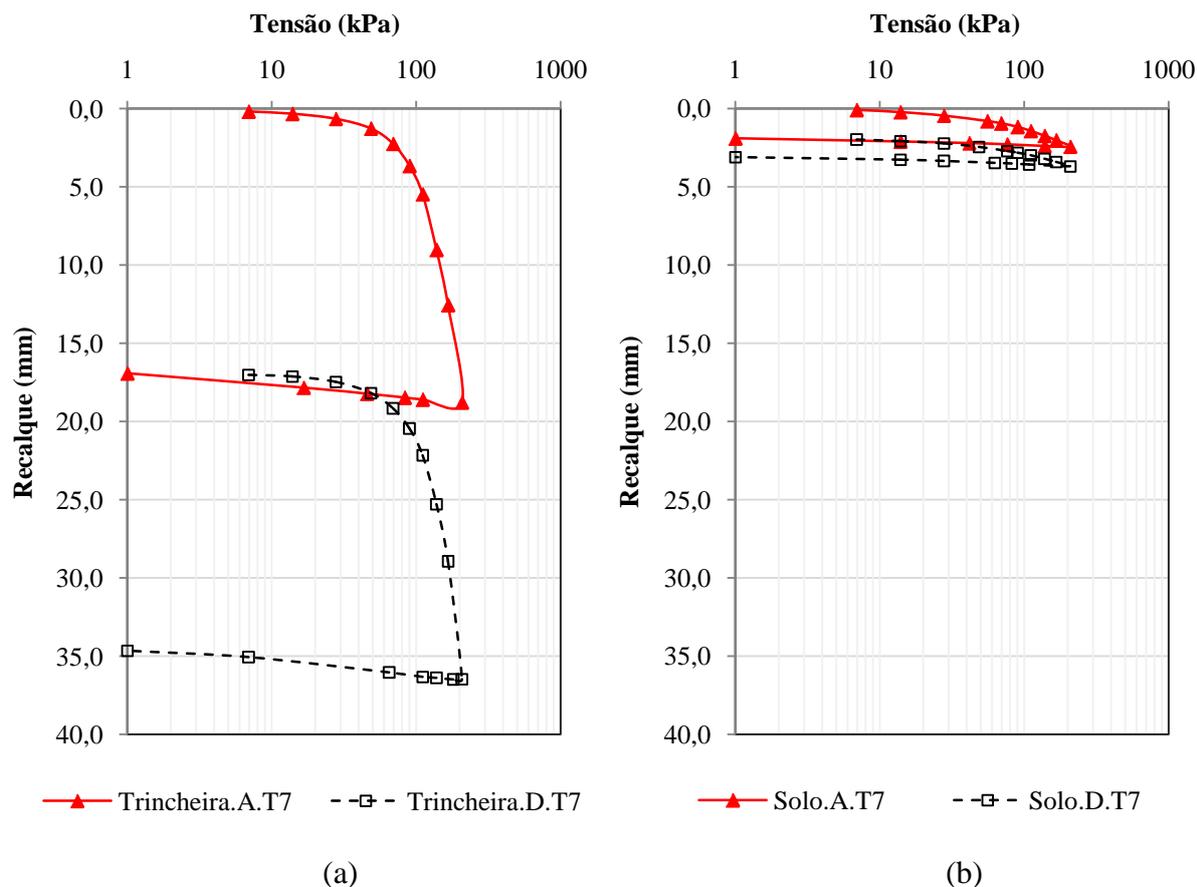


Figura 4.75 – Provas de carga no solo e no eixo da trincheira 7, antes e depois o ensaio de enchimento.

A melhor visualização comparativa entre os comportamentos determinados para as três trincheiras e para os solos ensaiados as Figuras 4.76a e 4.76b apresentou-se respectivamente os conjuntos dos resultados obtidos e já discutidos. As variações encontradas para os solos devem-se à heterogeneidade dos perfis de solo já verificadas, por exemplo, durante o estudo dos perfis de umidade.

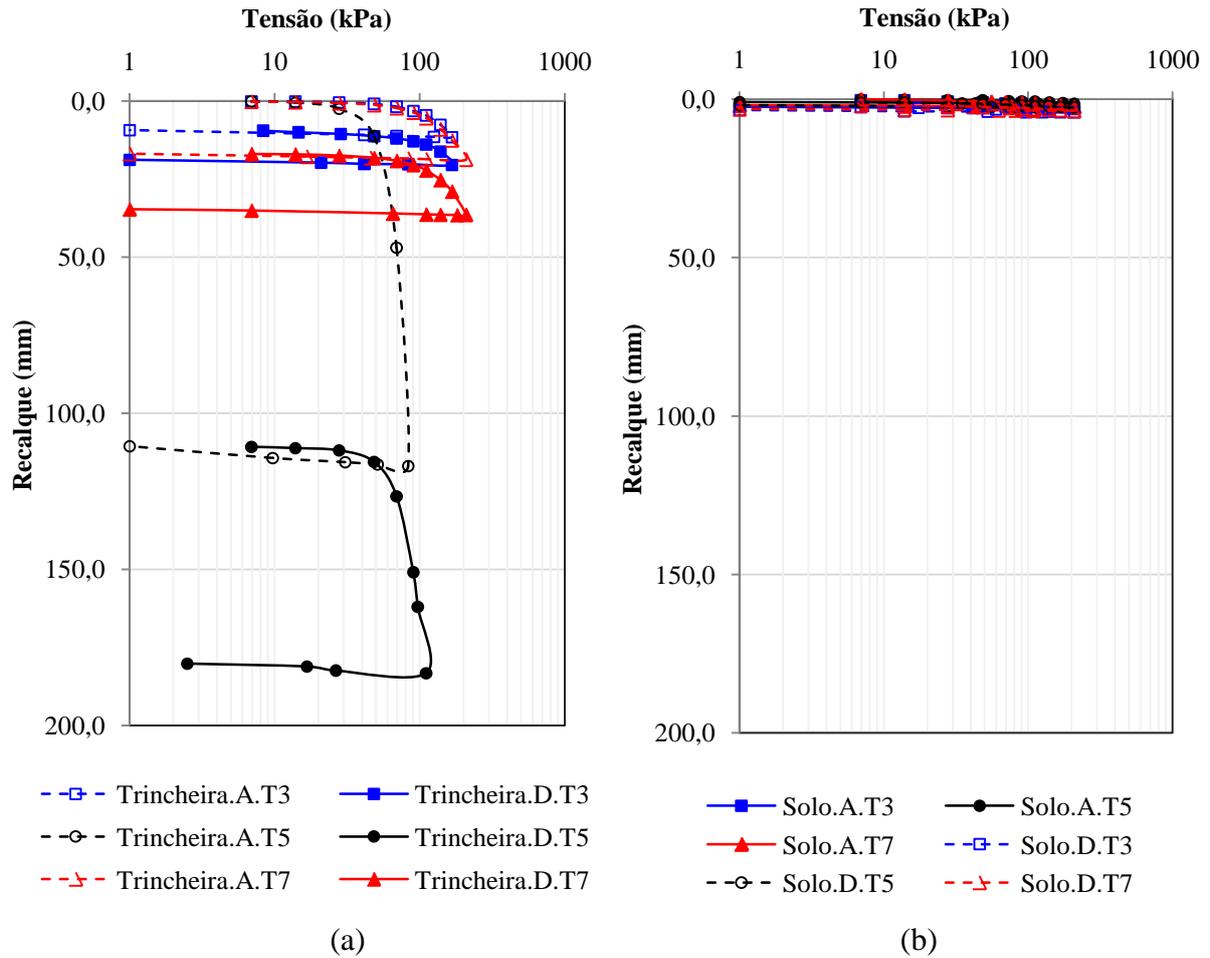


Figura 4.76 – Provas de carga no eixo das trincheiras e no solo próximo às trincheiras 3, 5 e 7, (a) antes e (d) depois do ensaio de enchimento.

## 5- CONCLUSÕES

Atualmente, um dos grandes desafios para as autoridades públicas é a minimização da ocorrência de inundações, enchentes e erosões causadas pelo acúmulo dos escoamentos superficiais decorrentes do aumento da impermeabilização da superfície do solo. Tal fato confronta-se com a insuficiência dos sistemas de drenagem convencionalmente empregados, que agravam ainda mais a situação direcionando os fluxos para jusante. Diante desse quadro, o presente estudo torna-se relevante por apresentar uma alternativa que busca associar as técnicas de engenharia às condições ambientais: recarga dos aquíferos, redução do risco de inundações junto aos centros urbanos, destinação de material reciclado (garrafas Pet) e diminuição de pontos suscetíveis a processos erosivos.

Na área em estudo, foram retiradas amostras para caracterização em laboratório, foram realizados ensaios de campo, monitoradas as variações climáticas por meio de uma estação meteorológica e construídas sete trincheiras de infiltração sendo cinco com preenchimento de garrafas PET (três com cortada/acoplada/furada em distintas configurações, uma com garrafas inteiras e outra com garrafas amassadas), uma convencional com preenchimento de brita 2 e uma com tijolo em crivo (sem preenchimento). Essas trincheiras foram ensaiadas, determinados os volumes e a capacidade de carga. Referente a esses estudos a pesquisadora chegou-se às seguintes conclusões:

a) Quanto às características do maciço de solo

-A infiltrabilidade obtida para o solo estudado habilita o seu uso para implantação de sistemas de infiltração sendo sempre necessárias preocupações com os fenômenos de colapso e de erosão interna embora esses não tenham sido constatados em campo no presente estudo. Nos ensaios de permeabilidade, obtiveram-se valores aproximados de  $10^{-3}$  cm/s, tanto no sentido vertical quanto no horizontal, o que aponta para a elevada drenabilidade e capacidade de infiltração do maciço;

- As permeabilidades horizontal e vertical estão diretamente ligadas às características das camadas e ao processo de intemperização pelo qual passou o maciço e são responsáveis pelo avanço da umidade, no espaço tridimensional. Das análises do avanço de umidade surge a necessidade de estudos complementares para melhor entender o fenômeno do fluxo nos solos profundamente intemperizados;

- Para manter as condições de infiltrabilidade no sistema, deve-se considerar que não houve deformação considerável do solo suporte, pois essa acarretaria em diminuição da permeabilidade vertical e perda da eficiência do sistema;

- O solo foi caracterizado em laboratório como sendo de elevada colapsibilidade. Os estudos prévios são importantes para escolha do material de enchimento das trincheiras de infiltração. Quando o solo for colapsível, como foi o caso, deve-se buscar preservar ou mesmo reduzir as tensões atuantes no maciço. Além de não ter sido possível monitorar o recalque nas bases das trincheiras durante os respectivos enchimentos, vários foram os fatores que dificultaram a comparação entre o enchimento convencional com brita (maior tensão transmitida ao solo suporte) e o uso de garrafas Pet (menor tensão transmitida ao solo suporte). No entanto, a comparação dos tempos de ensaio dispendidos nas trincheiras 4 e 5 durante as etapas 1 e 2, ao indicarem menores taxa de infiltração para a trincheira 4, apontam para possível colapso em sua base;

- O método IDW cria uma superfície de umidades, dando maiores pesos aos pontos de entrada e interpolando apenas os pontos entre eles. Esse método tem como vantagem apontar resultados que necessitam de maior atenção ou mesmo identificar pontos defeituosos. Em contrapartida, o método de Krigagem apresenta uma superfície de umidade homogênea na qual as mudanças de umidade apresentam-se de forma mais sensível, haja vista que este método interpola todos os valores (inclusive os de entrada). Sendo assim, com base nos estudos realizados, recomenda-se o uso do interpolador Krigagem para visualização da superfície de umidade;

b) Quanto ao uso das garrafas Pet como material de enchimento das trincheiras:

- O uso das garrafas Pets cortadas, perfuradas e acopladas permite ampliar a capacidade de armazenamento da trincheira gerando certo retardamento no processo de infiltração. Esse retardamento reflete menor energia de fluxo e pode ser interessante nos casos onde ocorre risco de erosão interna;

- O fenômeno da infiltração utilizando trincheiras de infiltração é complexo e o seu entendimento deverá ser ampliado com o auxílio de simulações numéricas;

c) Quanto à qualidade da água

- Os índices apresentaram variações, mas todos se situaram dentro dos limites admissíveis não indicando riscos de contaminação nos locais de infiltração;

d) Quanto à capacidade de carga

- Apesar de pequena a diferença nos recalques entre as trincheiras 3 e 7, a trincheira 3 (PET cortada/furada/acoplada) aponta para um melhor desempenho com recalques próximos a 10mm para uma tensão de até 150kPa. A trincheira 5 foi a que apresentou maior recalque durante as provas de carga.

### **5.1- SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

Sugere-se para pesquisas futuras:

- A utilização dos dados desta tese em simulações numéricas de modo a entender melhor os mecanismos de infiltração e o desempenho de cada um dos sistemas adotados;
- O estudo de outras geometrias para infiltração, variando profundidade e materiais. Analisando o solo de modo a identificar o nível freático que determinará a necessidade, ou não, de se limitar a profundidade da trincheira. Os materiais poderão ser de origem industrial ou reciclada variando a quantidade e a disposição dos arranjos;
- Avaliar por meio de análises microestruturais o efetivo risco de degradação do maciço devido ao fluxo de infiltração;
- Verificar, junto à administração pública do GDF (Governo do Distrito Federal) ou à FUB (Fundação Universidade de Brasília), a possibilidade de captar e usar as trincheiras construídas como modelo na infiltração de água de chuva oriunda de áreas impermeabilizadas e fazer o monitoramento ao longo do tempo;
- Avaliar a capacidade de infiltração e o tempo para colmatação de sistemas alternativos em áreas densamente ocupadas;
- Realizar a caracterização do escoamento destinado ao sistema convencional de drenagem e o escoamento infiltrado na fonte por sistemas alternativos;

- Realizar a análise de estabilidade nas paredes das trincheiras, que apresentarem profundidades elevadas em diversos solos, com características geotécnicas distintas;
- Analisar o comportamento de trincheiras de infiltração quando submetidas a fluxos de outros líquidos, tais como: água contaminada com óleos, graxas, combustíveis, entre outros. Tal estudo advém da necessidade de avaliar o real tempo de infiltração dos escoamentos oriundos de vias urbanas.

## 6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIPET (2009). Associação Brasileira da Indústria do PET, [www.abipet.org.br/](http://www.abipet.org.br/) < último acesso dia 30 de setembro de 2009.
- ABNT (1984). Solo – Determinação do Limite de Liquidez – NBR 6459/84. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/ RJ, 6 p.
- ABNT (1984). Solo – Determinação do Limite de Plasticidade – NBR 7180/84. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/ RJ, 3 p.
- ABNT (1984). Solo – Análise Granulométrica – NBR 7181/84. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/ RJ, 13 p.
- ABNT (1986). Solo – Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. – NBR 9604/86. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/ RJ.
- ABNT (1988). Solo – Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas (método da balança hidrostática) – NBR 10838/88. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/ RJ, 4 p.
- ABNT (1990). Ensaio de adensamento unidimensional – NBR 12007/90. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/ RJ, 13 p.
- ABNT (1998). Solo – Solos argilosos dispersivos – Identificação e Classificação por meio do ensaio do furo e agulha (pinholetest) – NBR 14114/98. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/ RJ, 8 p.
- ABGE (1996). Ensaio de permeabilidade em solos – Orientações para sua execução. Coordenação Antonio Manuel dos Santos Oliveira e Diogo Correa Filho – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, São Paulo, SP – Boletim 04, (3ª Edição Revisada).
- Andreolli, I. (2003). Previsão em tempo real no rio Uruguai com base na previsão meteorológica. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 182 p.
- Andriotti, J. L. S., (2009). Fundamentos de Estatística e Geoestatística, Editora Unisinos, 2ª reimpressão. Câmara, G.; Souza, R.C.M.; Freitas., U.M.; Garrido, J.; & II, F.M. (1996) *SPRING: integrating remote sensing and GIS by object oriented Data modeling*. National Institute for Space Research (INPE), Brazil. *J Computer & Graphics* 20 (3): 395-403.

- Appel, P. L. e Hudak, P. F. (2001). “*Automated sampling of stormwater runoff in an urban watershed, north-central Texas*”. Journal of Environmental Science and Health. 36, 6, 897-907.
- Araújo, G. L. S (2009). Estudo em Laboratório e em Campo de Colunas Granulares Encamisadas com Geossintéticos, Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília. 143 p.
- Azzout, Y.; Barraud, S; Cres, F. N; Alfakih, E. (1994). *Techniques alternatives en assainissement pluvial: choix, conception, réalisation et entretien*. Paris: Lavoisier. 372p.
- Baptista, M. B.; Nascimento, N. O.; Barraud, S. (2005). Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana. ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre – RS.
- Baptista, M. B.; Nascimento, N. O.; Souza, V. C. B.; Costa, L. S. G. M. (1997). Utilização de tecnologias compensatórias no projeto de um sistema de drenagem urbana. In: Congresso Nacional Del Agua, 17., 1998, Santa Fe; e Simpósio De Recursos Hídricos Del Conosur, 2., 1998, Santa Fe. Anales. Santa Fé: Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional Del Litoral. V.2,p.248-257.
- Balades, J.D.; Berga, P.; Bourgoigne, P. (1998). *Impact d’une tranchéedrainante par temps de pluie*. In: International Conference On Innovative Technologies In Urban Drainage, 3., 1998, Lyon. Novatech 1998. Lyon: GRAIE. p. 551-558.
- Braune, M. J.; e Wood, A. (1999). *Best Management Practices Applied to Urban Runoff Quantity and Quality Control*. Water Science Technology, v. 39, n. 12, p. 117-121.
- Brito, D. S. (2006). Metodologia para Seleção de Alternativas de Sistemas de Drenagem. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-094/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 117p.
- Camargo, E.C.G. (1997). Desenvolvimento, Implantação e Teste de Procedimentos Geoestatísticos (krigagem) no Sistema de Processamento de Informações Georreferenciados (SPRING). Dissertação de Mestrado, INPE, São José dos Campos, SP, 105 p.
- Camapumde Carvalho, J., González, Y. V., Santos, M. A. A., Gitirana Jr, G.(2007). *Estabilidad de untaludcón cavo considerando condiciones en 3D* In: XIII Conferencia Panamericana de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, 2007, Isla de Margarita. XIII Conferencia Panamericana de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Isla de Margarita: SVDG e ISSMGE, 2007. p.988 – 993)

- Camapum de Carvalho, J.; Leroueil, S. (2000). Modelo de normalização de curvas características. 32ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Brasília, DF, 1:96-106.
- Camapum de Carvalho, J.; Lelis, A. C. (2011). Cartilha de Infiltração. Série Geotecnia, Universidade de Brasília. Brasília-DF.
- Campbell Scientific do Brasil (2009). <http://www.campbellsci.com.br/> < último acesso dia 23/novembro/2009.
- Campos, I.C.O.; Guimarães, E.M.; Camapum De Carvalho, J. (2008). Busca de Entendimento da Curva Característica de Materiais Expansivos. Proc. XIV COBRAMSEG, Búzios, RJ. 1535-1542.
- Cardoso, F. B. F. (1995). Análise Química, Mineralógica e Micromórfologica de Solos Tropicais Colapsíveis e o Estudo da Dinâmica do Colapso. Dissertação de Mestrado, Publicado G.DM-026A/95, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 140 p.
- Cardoso, F.B.F. (2002). Propriedades e comportamento mecânico de solos do Planalto Central Brasileiro. Teses de Doutorado em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília. Brasília – DF, 357 p.
- Carvalho, E. T. L. (2008). Avaliação de elementos de infiltração de águas pluviais na zona Norte da cidade de Goiânia. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 222p.
- Davis, A.P. E Burns, M. (1998). “*Evaluation of lead concentration in runoff from painted structures.*” Water Research. 33,13, 2949-2958.
- Davis, A.P., Shokouhian, M. E Ni, S. (2001). “*Loading estimates of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources.*” Chemosphere. 44, 997-1009.
- Duchene, M.; Mcbean, E.; E Thomson, N. (1994). *Modeling of infiltration from trenches for storm-water control.* Journal of Water Resources Planning and Management, v. 120, n. 3, p. 276-293.
- EMBRAPA (1978). Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Distrito Federal. Boletim Técnico, nº 53, SNLCS, Rio de Janeiro, RJ, 212p.
- EPA (1987). Environmental Protection Agency. [www.epa.gov/](http://www.epa.gov/).
- Farias, W. M., Camapum de Carvalho, J., Silva, G. F., Campos, I. C. O., Murrieta, P. S. N. (2011). Influência da compactação nos micro e mesoporos nanoestruturados e na área superficial específica de um solo laterítico. VII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Pirenópolis-GO, 169-175.

- Field, R. E O'shea, M. L. (1994). "The handling and disposal of residual from the treatment of urban stormwater runoff from separate storm drainage systems." *Water Management & Research*. 12, 527-539.
- Fredlund, D. G.; Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. Ed. John Wiley & Sons, New York, NY, 517p.
- Freitas, V.A. (2000). Análise de dados espaciais por meio desemivariogramas. Universidade Federal de Uberlândia, 34p.
- Gomes, V. M. (2004). Aspectos qualitativos e quantitativos da água de drenagem pluvial em sub-bacia urbana na cidade de Brasília-DF. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, publicação PTARH.DM-068/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 85p.
- Graciosa, M. C. P. (2005). Trincheiras de infiltração como tecnologia alternativa em drenagem urbana: modelagem experimental e numérica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 231 p.
- Graciosa, M. C. P.; Mendiondo, E. M.; E Chaudhry, F. H. (2008). Metodologia para o Dimensionamento de Trincheiras de Infiltração para o Controle do Escoamento Superficial na Origem. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 13, n.2, p. 207-214.
- Guimarães, R. C. (2002). Análise das Propriedades e Comportamento de um Perfil de Solo Laterítico Aplicada ao estudo do Desempenho de Estacas escavadas. Dissertação de Mestrado, Publicado G.DM-090A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 183 p.
- Kronaveter, L.; Shamir, U.; E Ekessler, A. (2001). *Water sensitive urban planning: modeling on-site infiltration*. *Journal of Water Resources Planning and Management*. v. 127, n. 2, p. 78 - 88.
- Kuo, C. Y.; Zhu, J. L. E Dollard, L. A. (1989). *A study of infiltration trenches*. Virginia Water Resources Research Center, Bulletin 163, 87 p.
- Jonasson, S. A., (1984). *Dimensioning Methods for Stormwater Infiltration Systems*. In: International Conference on Urban Storm Drainage, 3., 1984, Göteborg. Proceedings. Göteborg: Chalmers University of Technology. V.3, p. 1037-1046.
- Jones, W. M.; Overton, G. D. N.; Trevena (1981). *Tensile strength experiments with water using a new type of Berthlot tube*. *Journal of Physics D: Applied Physics*, v. 14, p. 1283-1291.
- Landim, P.M.B. (2000). Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas. Unesp, São Paulo, SP, 18 p.

- Landim, P. M. B., Sturaro, J. R. & Monteiro .R. C. (2002). Krigagem ordinária para situações com tendência regionalizada. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomática, Texto didático 06, 12 pp. Disponível em <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>
- Leeflang, M.; Monster, N.; Van De Vem, F. (1998). *Design graphs for stormwater infiltration facilities*. Hydrological Sciences Journal, Wallingford, V.43, n.2, p.173-180, Apr.
- Lima, V. C. G. R. (2009). Análise experimental e numérica de trincheiras de infiltração em meio não saturado. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2009.
- Marinho, F.A.M. (1995) Medição de sucção com o método do papel filtro. Congresso Brasileiro de Mecânica dos solos e Engenharia de Fundações, 10, Foz do Iguaçu. Anais, Vol 2, Pg 515-522.
- Marinho, F. A. M; Chandler, R. J. (1994)*On the relationship between suction and degree of saturation of soils*. In: 2º Simpósio sobre solos não saturados. Recife, Pernambuco, Anais..., p. 37-44.
- Miranda, J., I.(2005). Embrapa Informacao Tecnológica Fundamentos de sistemas de informações geográficas. Brasília, EMBRAPA Informação Tecnológica, 425p.
- Nascimento, N. O.; Baptista, M. B.; E Souza, V. C. B. (1997). Sistema Hidrourb para o pré-dimensionamento de soluções alternativas de drenagem urbana -parte1: Conceitos. In: Simpósio Nacional de Recursos Hídricos, 12. Vitória. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. São Paulo: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, v. 3. p. 669-676.
- Nogami, J. S.; Villibor, D. F. (1994). Identificação expedita dos grupos de classificação MCT para solos tropicais. 10º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Vol. 4, Foz do Iguaçu, PR, ABMS. p. 1293-1300.
- Nogami, J. S. E Villibor, D. F., (1995). Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos. São Paulo, Villibor. 213p.
- Paixão, M. N. O. N.; Camapum De Carvalho, J. (1994). Influência da Microestrutura no Colapso de um Solo de Brasília. 2º Simpósio Sobre Solos não Saturados, AMFS-UFPE/ABMS-NE, Recife, PE, 1:105-110.
- Paranhos, H. (2002). Utilização de Sucatas PET, Entulho de Obras e Pneus como Material Drenante em Obras de Geotecnia e Meio Ambiente. Programa de Capacidade de Recursos Humanos para Atividade Estratégica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 69p.
- Reichardt, K. (1985). Processos de transformação no sistema solo-planta-atmosfera, Campinas, Fundação Cargill.

- Roesner, L. A.; Bledsoe, B. P.; E Brashear, R. W. (2001). *Are best – management – practices criteria really environmentally friendly*. In: Journal Water Resources Planning and Management, v. 127, n. 3, p. 150-154.
- Rossi, R. E., Dungan, J. L., Beck, L. R. (1994). *Kriging in the shadows: geostatistical interpolation for remote sensing*. Remote Sens. Environ., v.49, p. 32-40.
- Silva, A. M. (2005). Banco de dados de Curvas de Retenção de Água de Solos Brasileiros. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 136p.
- Silva, J. P. (2007). Estudos Preliminares para implantação de Trincheiras de Infiltração. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 155p.
- Silva, G. B. L. (2006). Avaliação Experimental Sobre a Eficiência de Superfícies Permeáveis com Vistas ao Controle do Escoamento Superficial em Áreas Urbanas. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 180p.
- Silva, J. D. (2006). Estudo da Colapsibilidade da Argila Porosa de Brasília pelo Fluxo de Contaminantes. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 141p.
- Silva Junior, A. C. (2011). Avaliação das flutuações sazonais de umidade e sucção em um perfil de solo tropical. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Departamento de Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 137p.
- Silveira, A. L. L. (1999). Impactos hidrológicos da urbanização em Porto Alegre. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 13., 2001, Belo Horizonte. Anais. Porto Alegre: ABRH. 1CD.
- Silveira, A. L. P. (2003). Pré dimensionamento hidrológico de pavimentos permeáveis e trincheiras de infiltração. Artigo Publicado no Simpósio ABRH/2003, Curitiba, PR, 10 p.
- SN 670 (2002). *Contrôle de la qualité du compactage par pénétromètres dynamiques. Norme enregistree de l'association Suisse de normalisation*. Versio 1c. dezembro/2002. Suíça. 17p.
- Souza, V. C. B. (2002). Estudo Experimental de Trincheiras de Infiltração no Controle da Geração do Escoamento superficial. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 127 p.
- Stannard, D.I. (1992) *Tensiometers – theory, construction, and use*. *Geotechnical Testing Journal*, v.15, nº 1, p. 48-50.

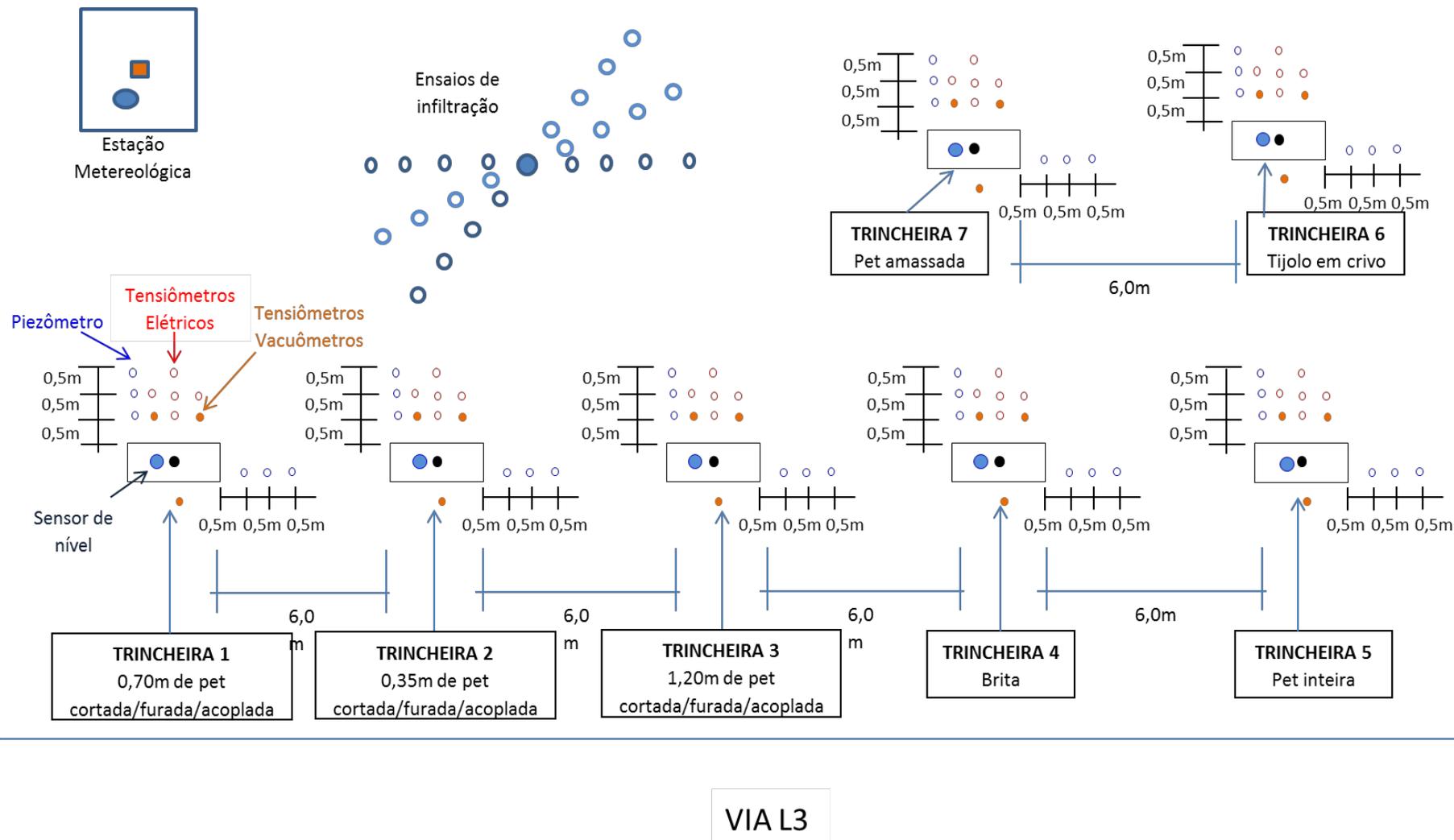
Urbanas, B.; Stahre, P., (1993). *Stormwater. Best management practices and detention for water quality, drainage and CSO management*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 447 p.

Warnaars, E.; Larsen, A. V.; Jacobsen, P.; E Mikkelsen, P. S. (1999). *Hydrologic behaviour of stormwater infiltration in a central urban area during 2 ¾ years of operation*. Water Science and Technology Technology, v. 39, n. 2, p. 217-224.

Zimmer, U.; Geiger, F. W.; Winzig, G.; Burghardt, W. (1998). *Use of finite element methods to optimise the construction of infiltration trenches and reservoir structures*. In: International Conference On Innovative Technologies In Urban Drainage, 3., 1998, Lyon. Novatech 1998. Lyon: GRAIE. P. 505-512.

<http://www.coladaweb.com/biologia/bioquimica/ciclos-biogeoquimicos>.

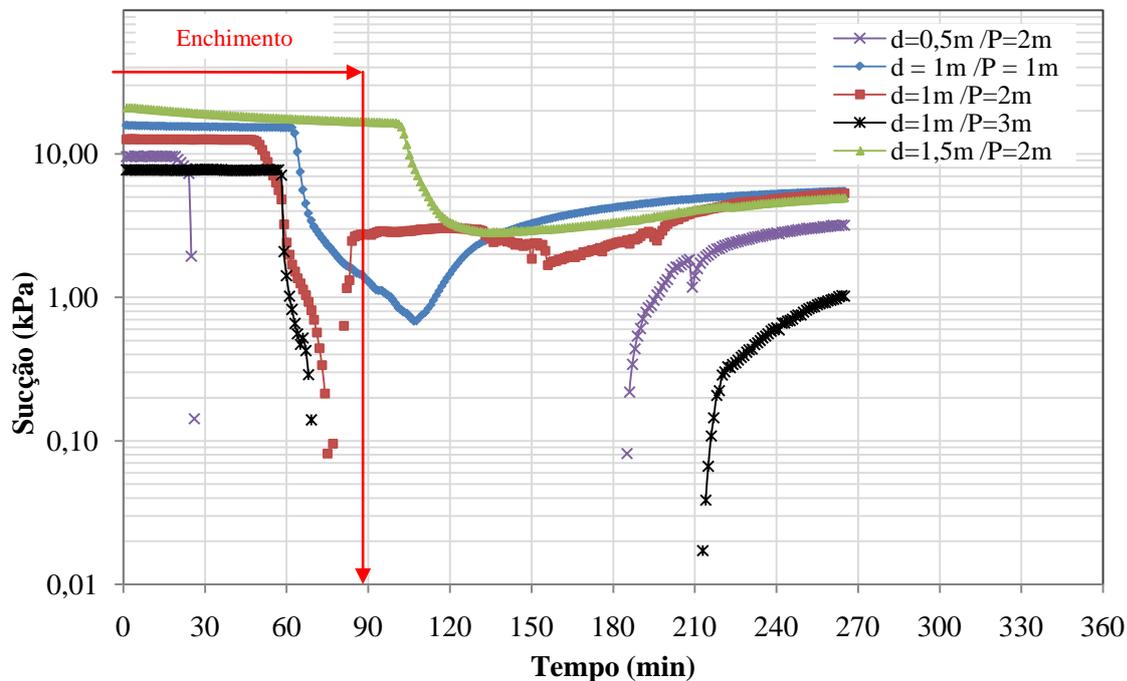
<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap2-CH.pdf>.



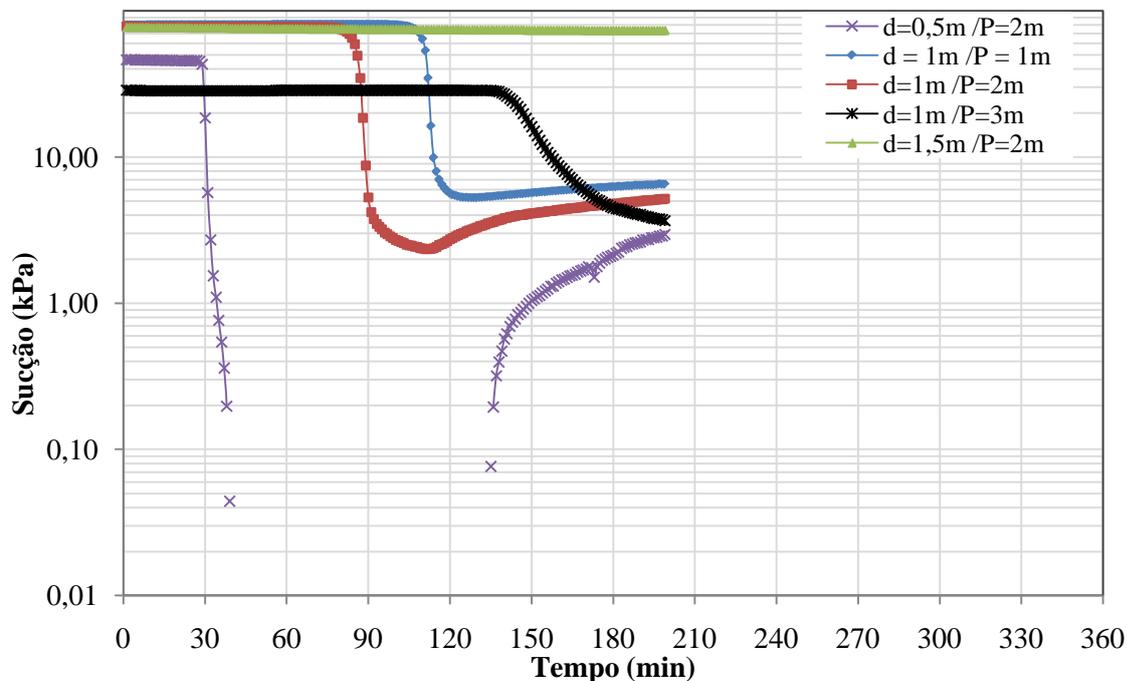
A1- Layout de distribuição das trincheiras, instrumentos, ensaios de campo e estação meteorológica. -

## ANEXO “B”

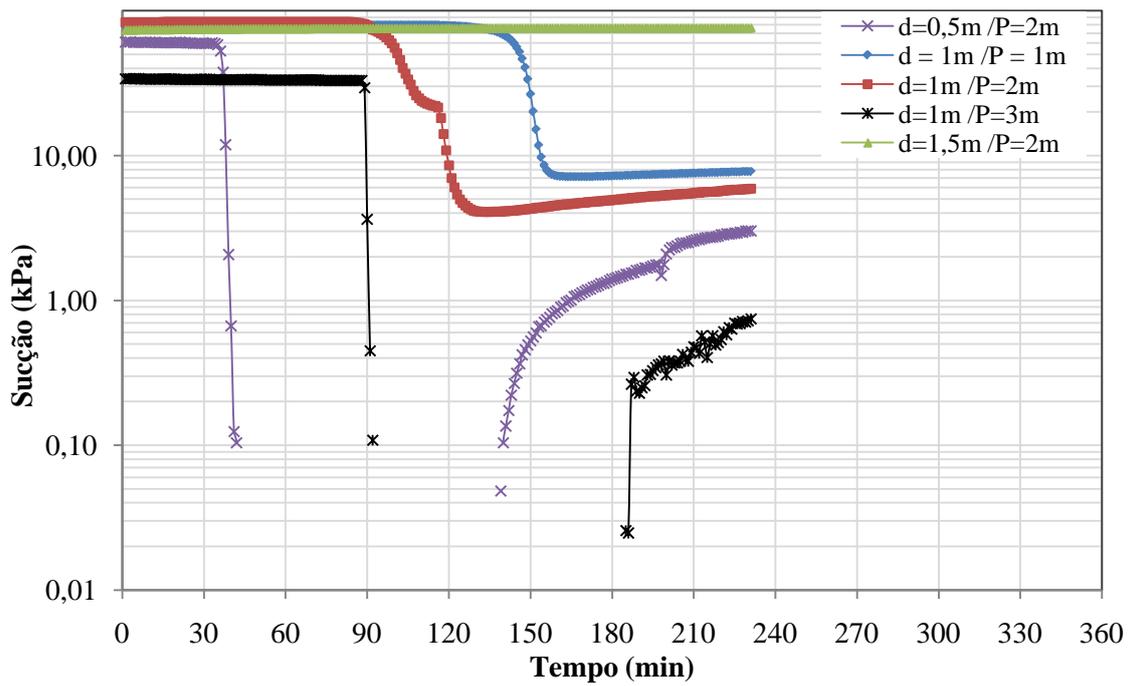
### Tensiômetros Eletrônicos



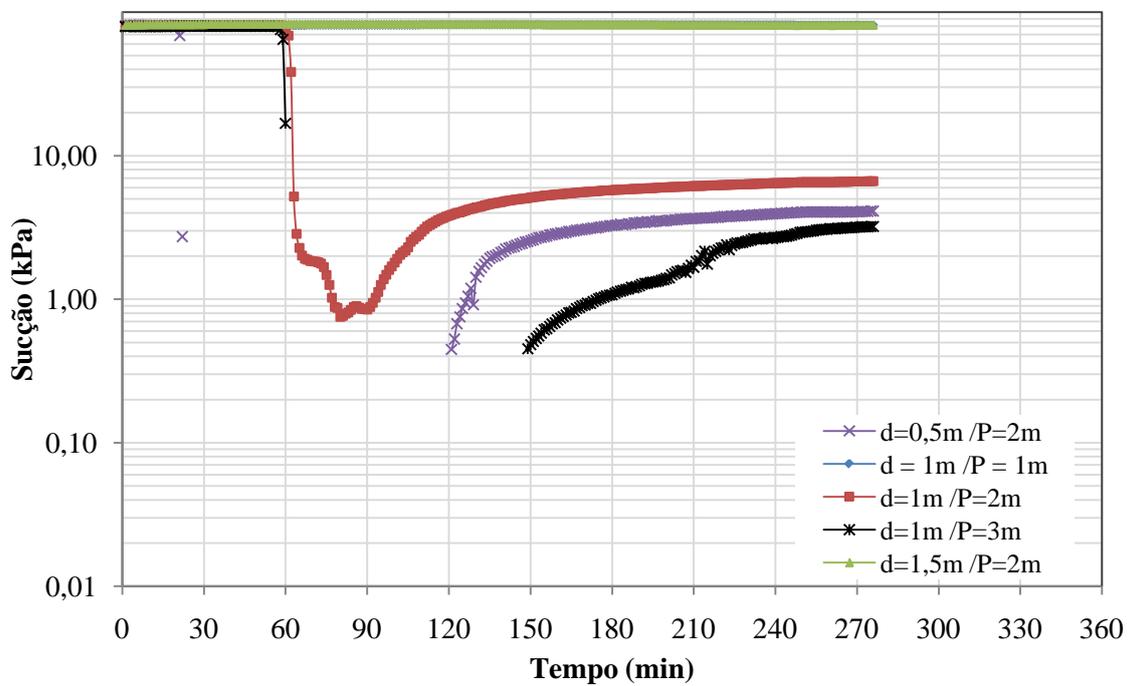
B1 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do primeiro ensaio de enchimento Trincheira 1.



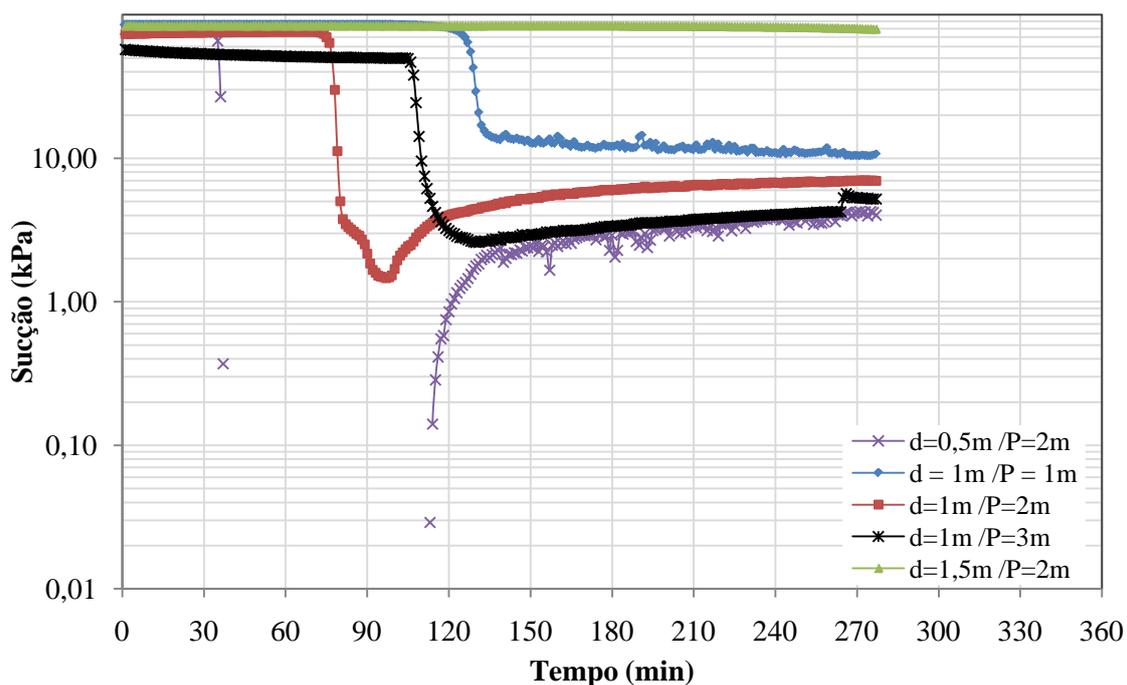
B2 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do primeiro ensaio de enchimento Trincheira 2.



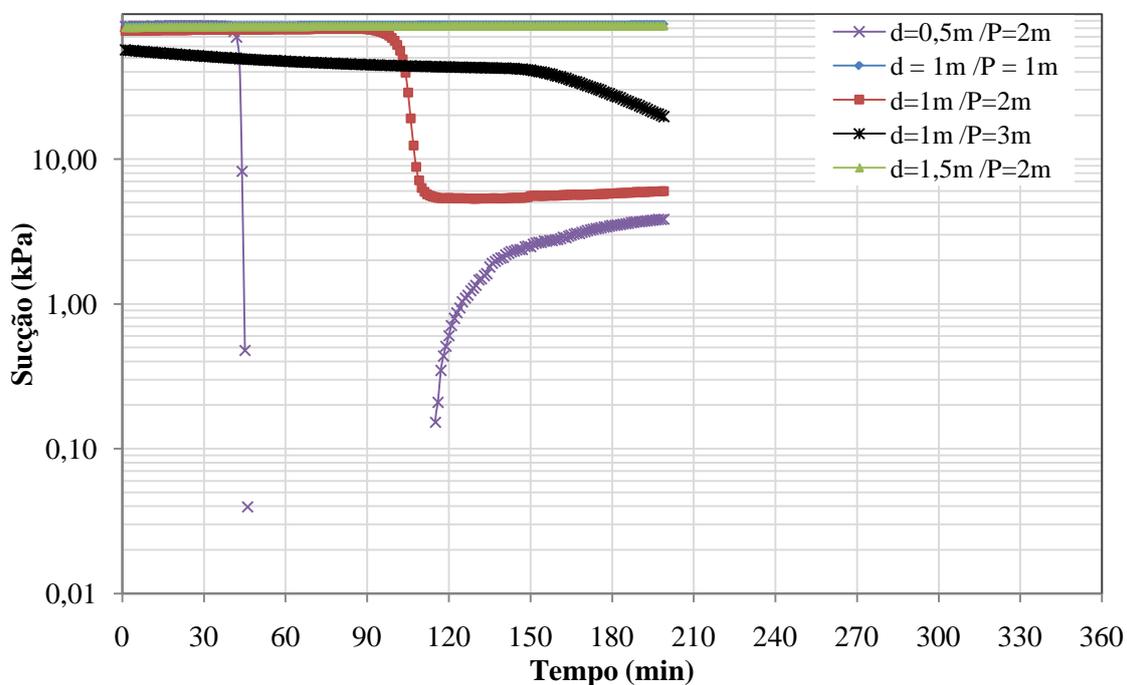
B3 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do primeiro ensaio de enchimento  
 Trincheira 3.



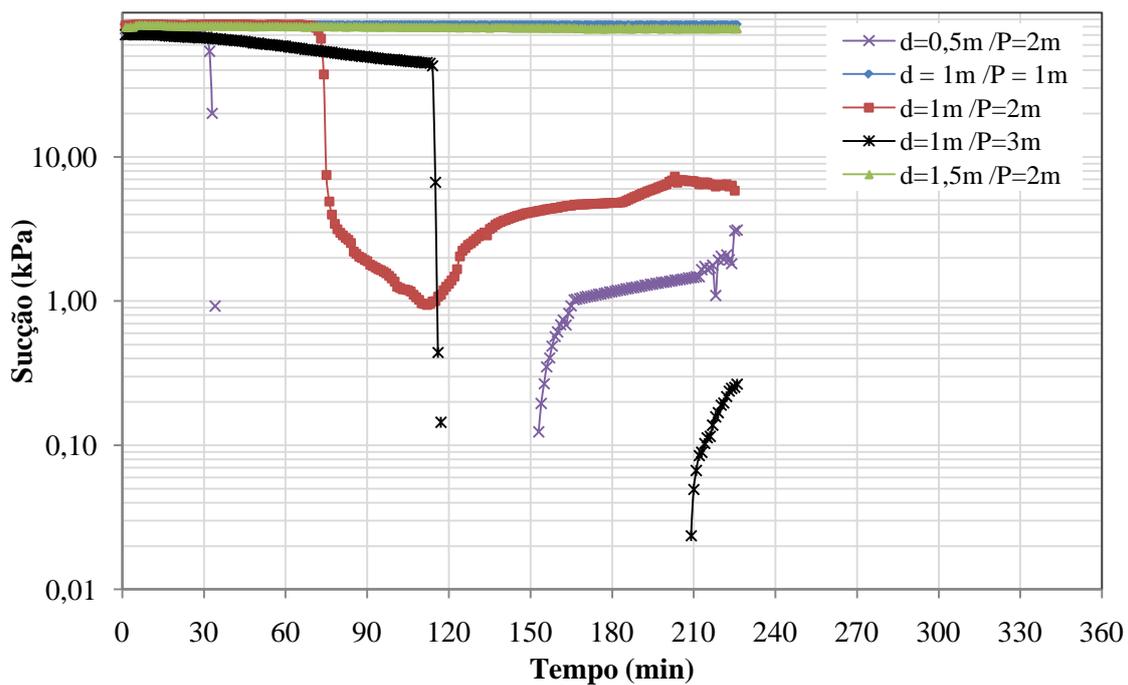
B4 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do primeiro ensaio de enchimento  
 Trincheira 4.



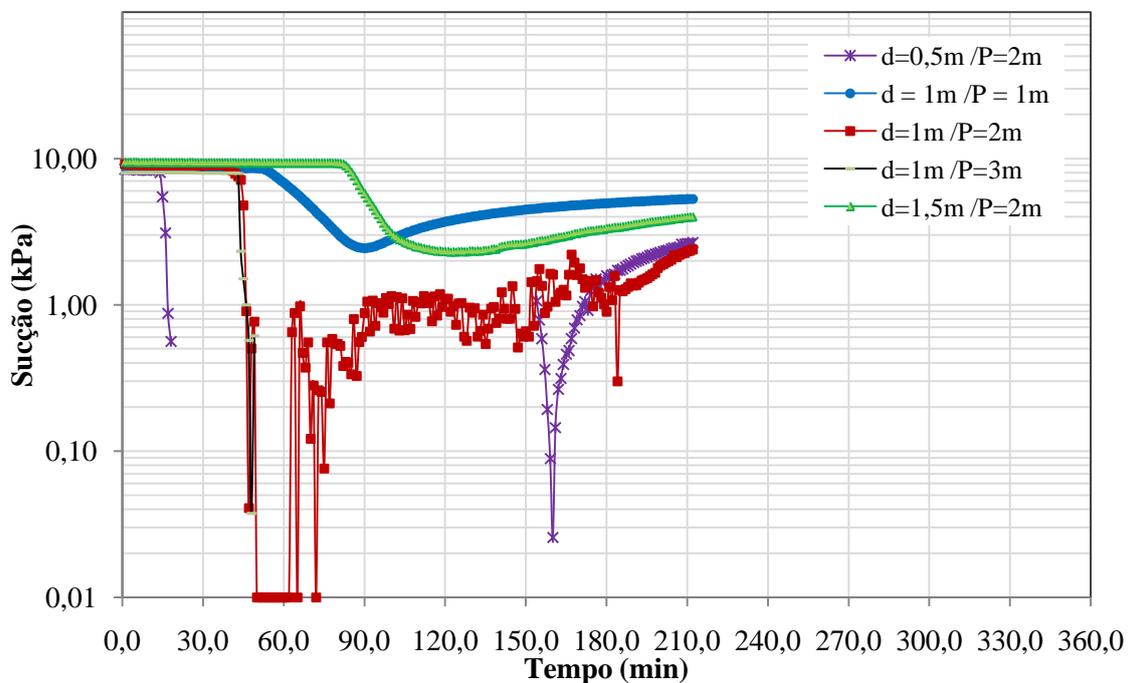
B5 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do primeiro ensaio de enchimento Trincheira 5.



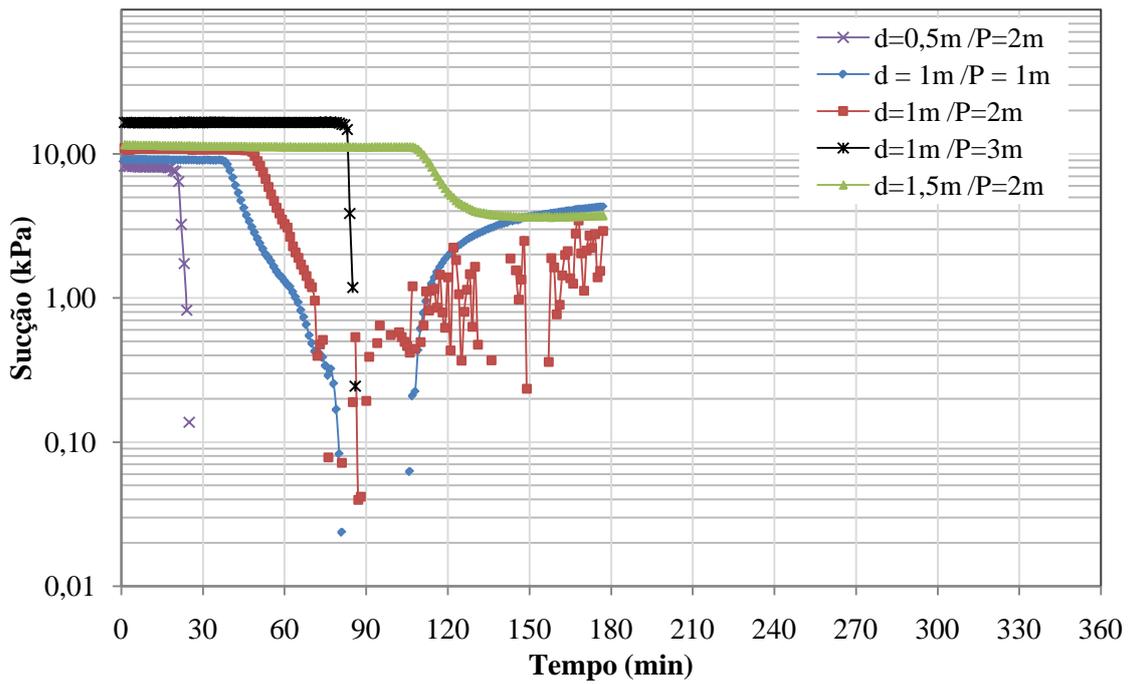
B6 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do primeiro ensaio de enchimento Trincheira 6.



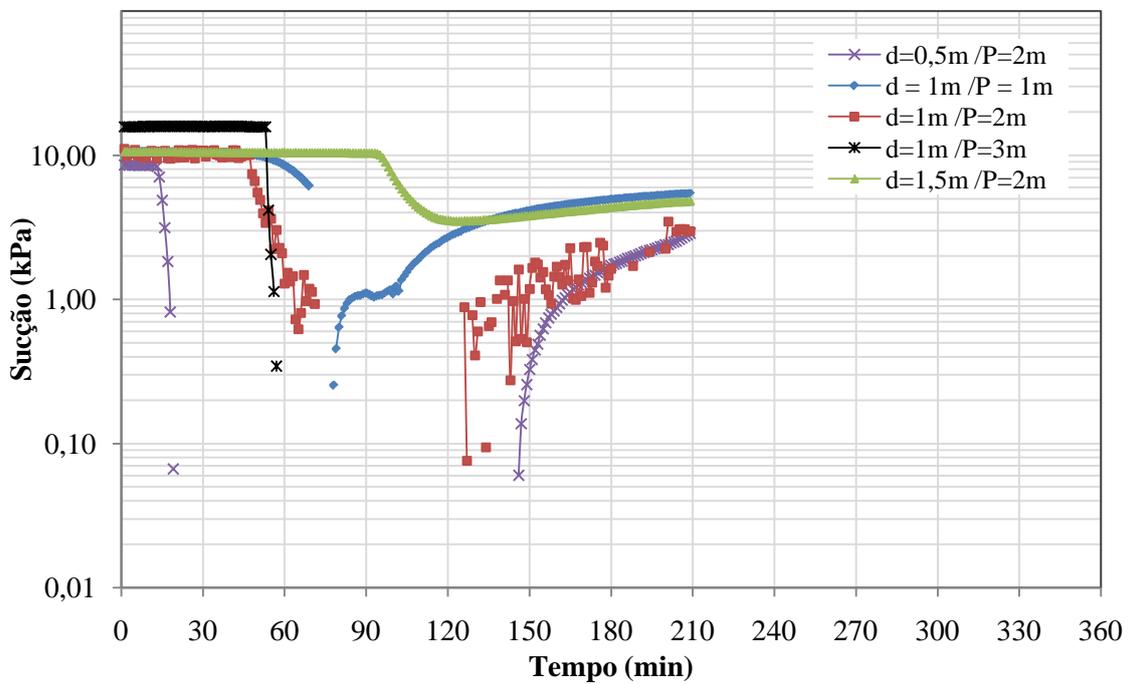
B7 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do primeiro ensaio de enchimento Trincheira 7.



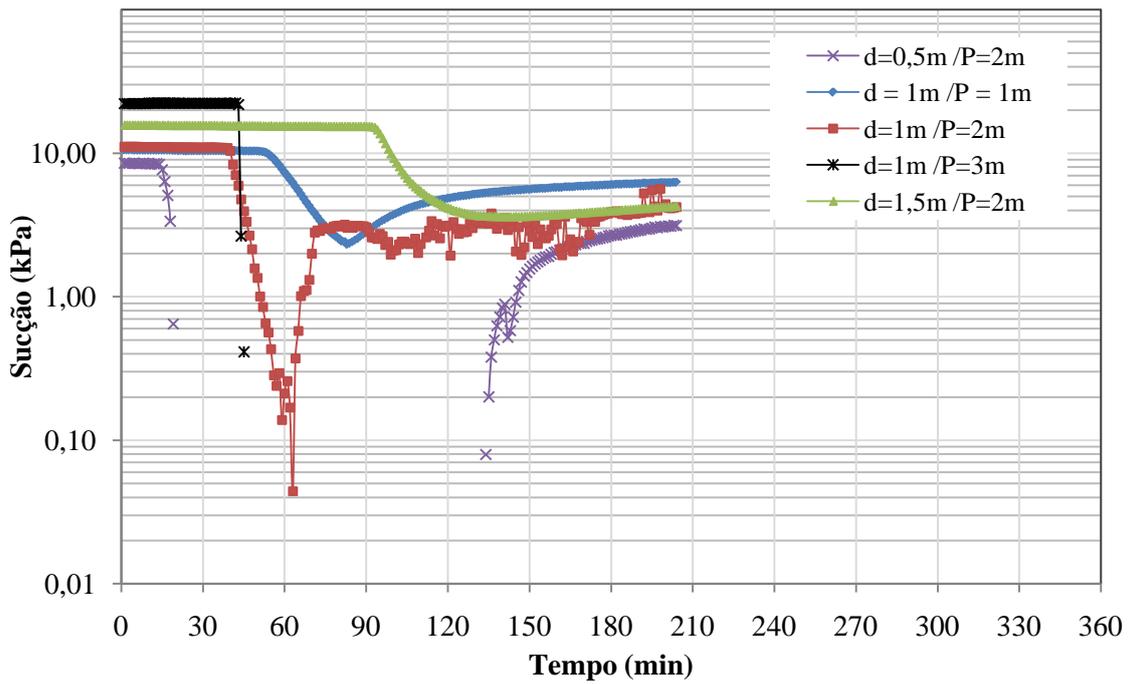
B8 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do segundo ensaio de enchimento Trincheira 1.



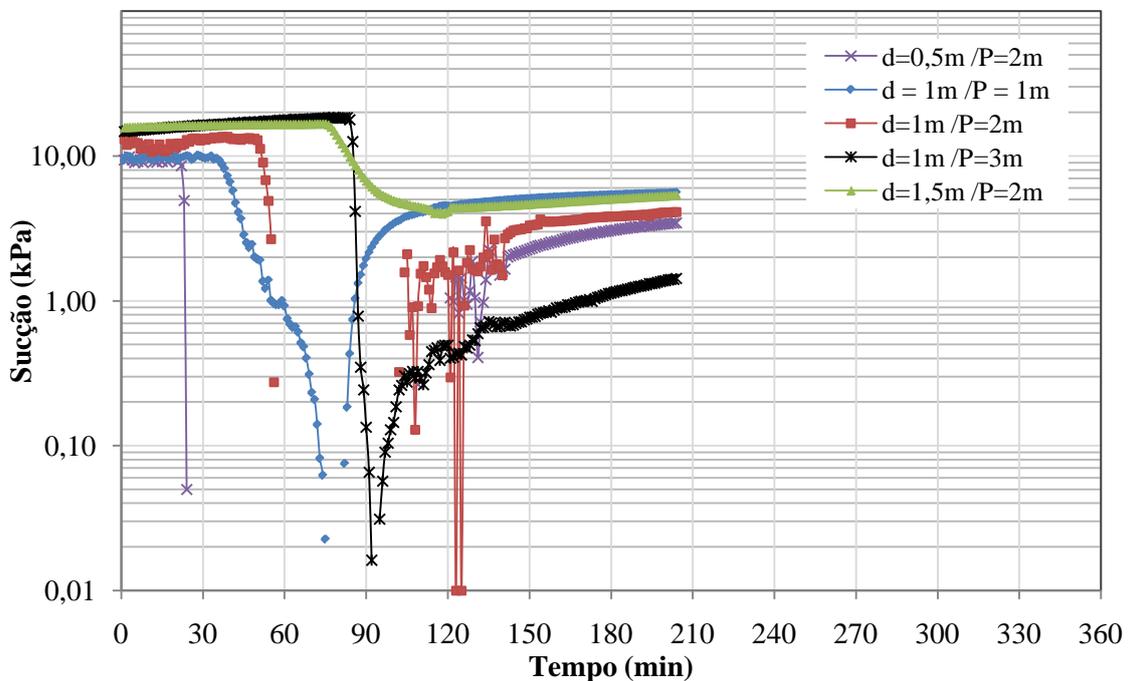
B9 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do segundo ensaio de enchimento  
Trincheira 2.



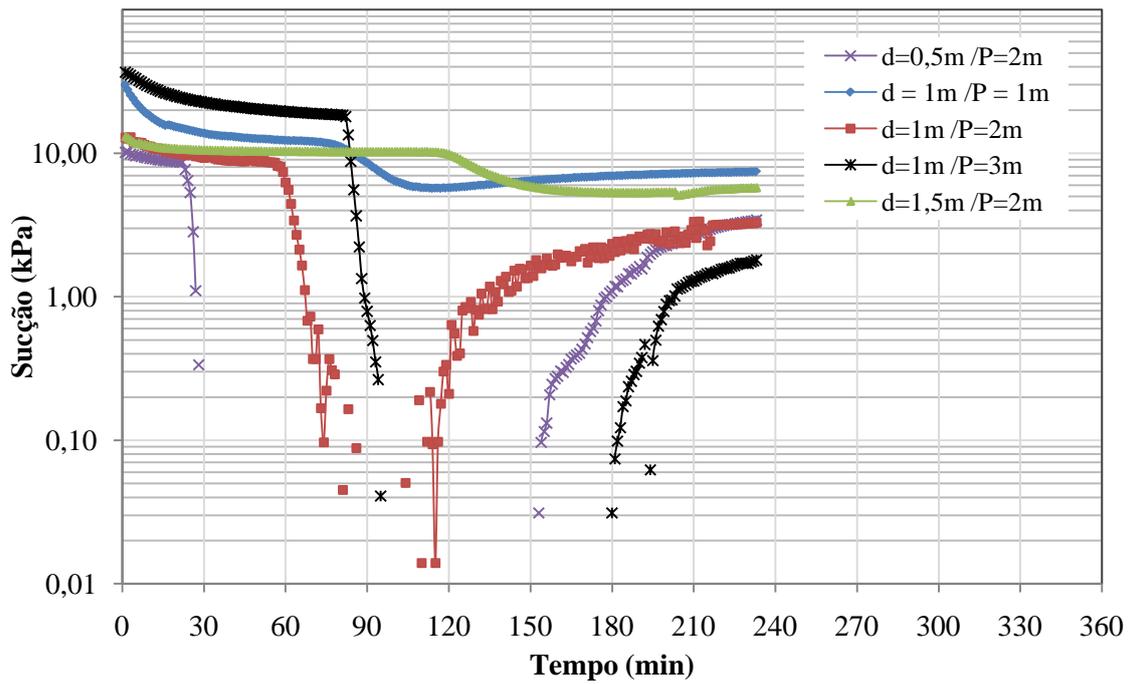
B10 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do segundo ensaio de enchimento  
Trincheira 3.



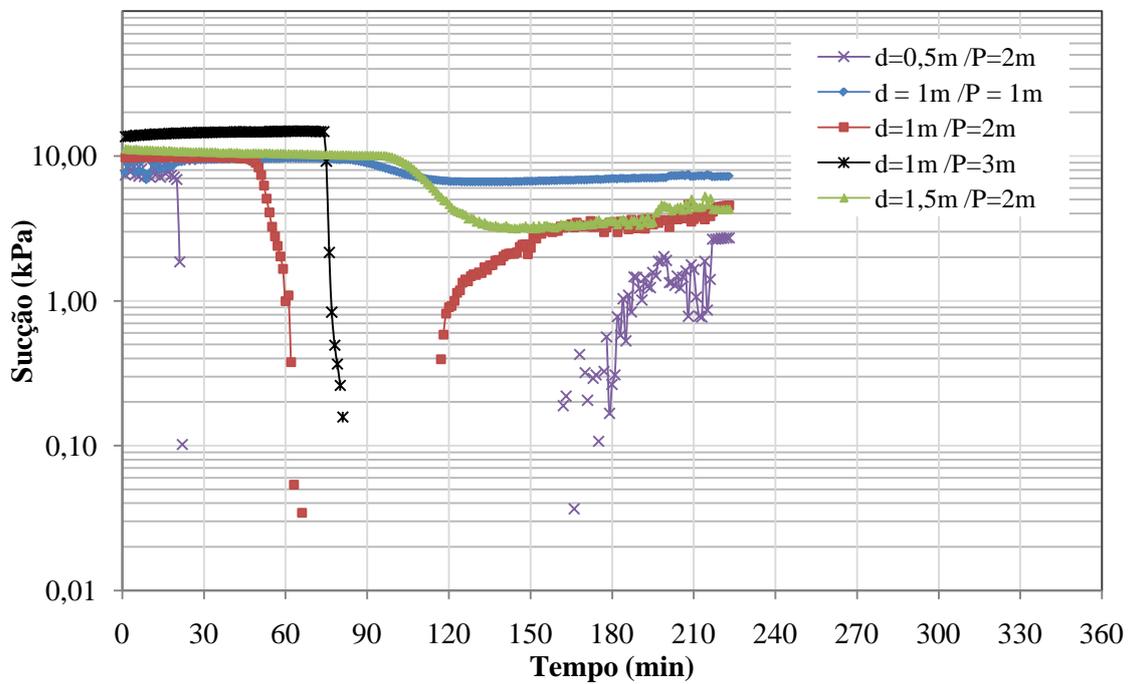
B11 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do segundo ensaio de enchimento  
Trincheira 4.



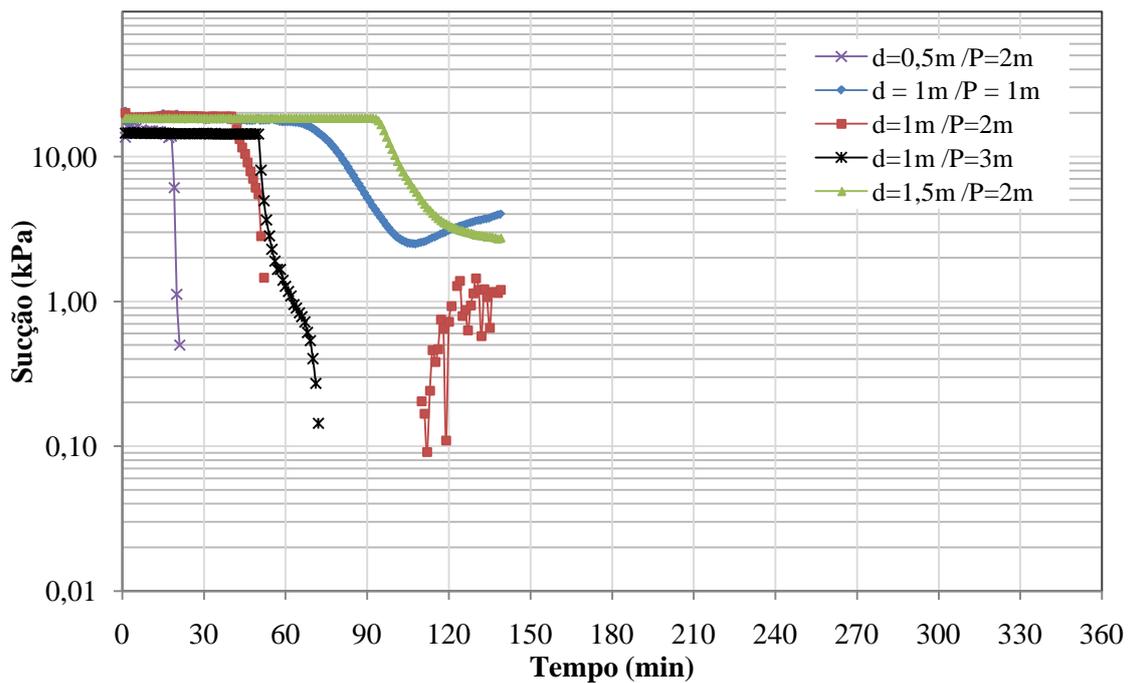
B12 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do segundo ensaio de enchimento  
Trincheira 5.



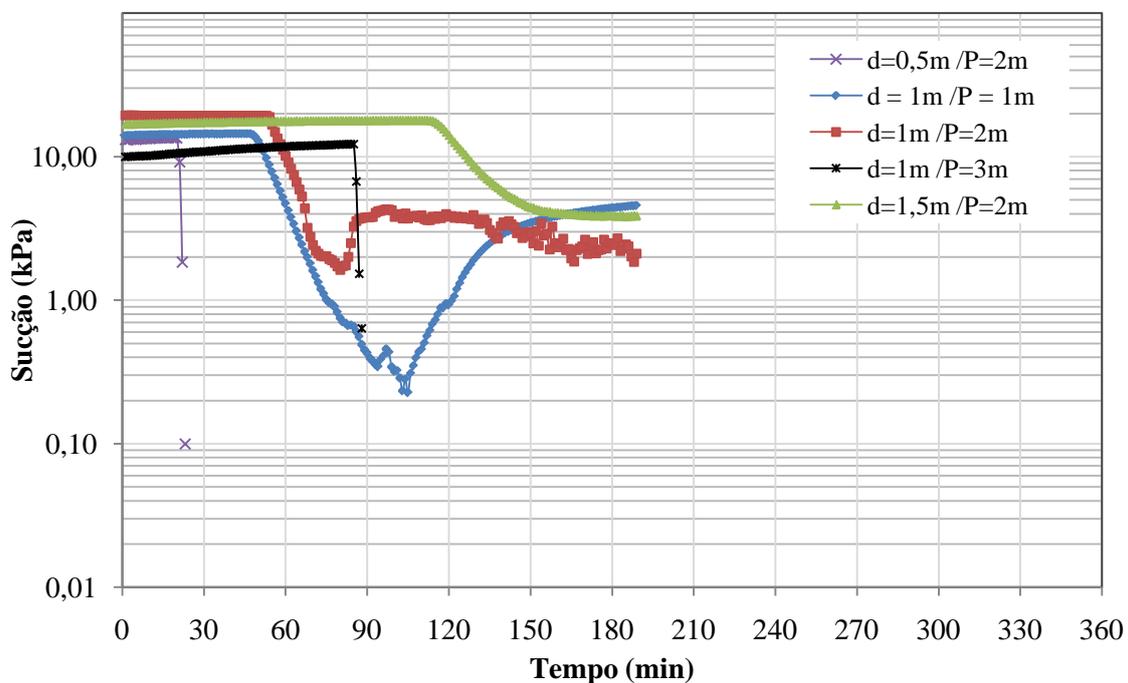
B13 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do segundo ensaio de enchimento  
Trincheira 6.



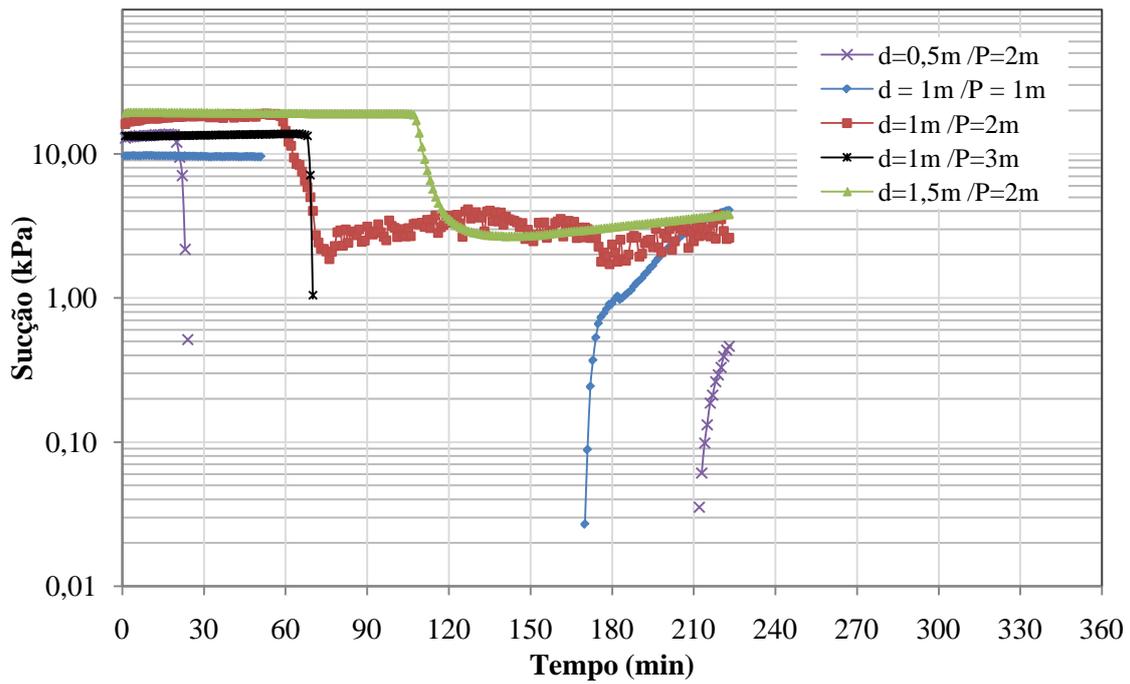
B14 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do segundo ensaio de enchimento  
Trincheira 7.



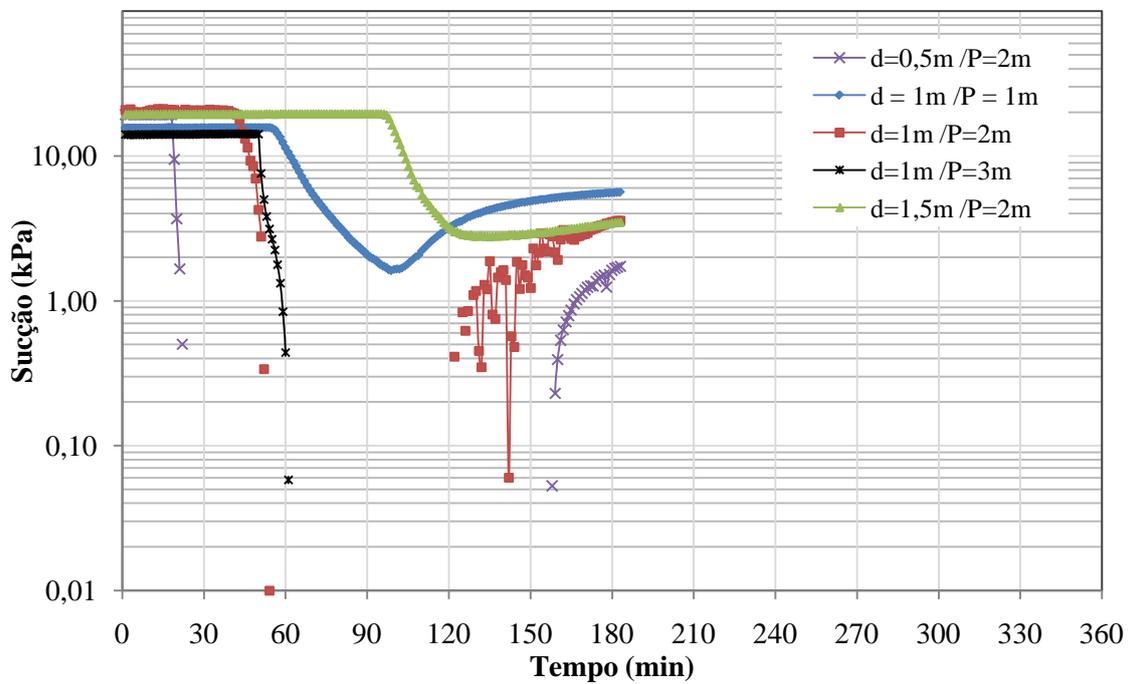
B15 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do terceiro ensaio de enchimento  
Trincheira 1.



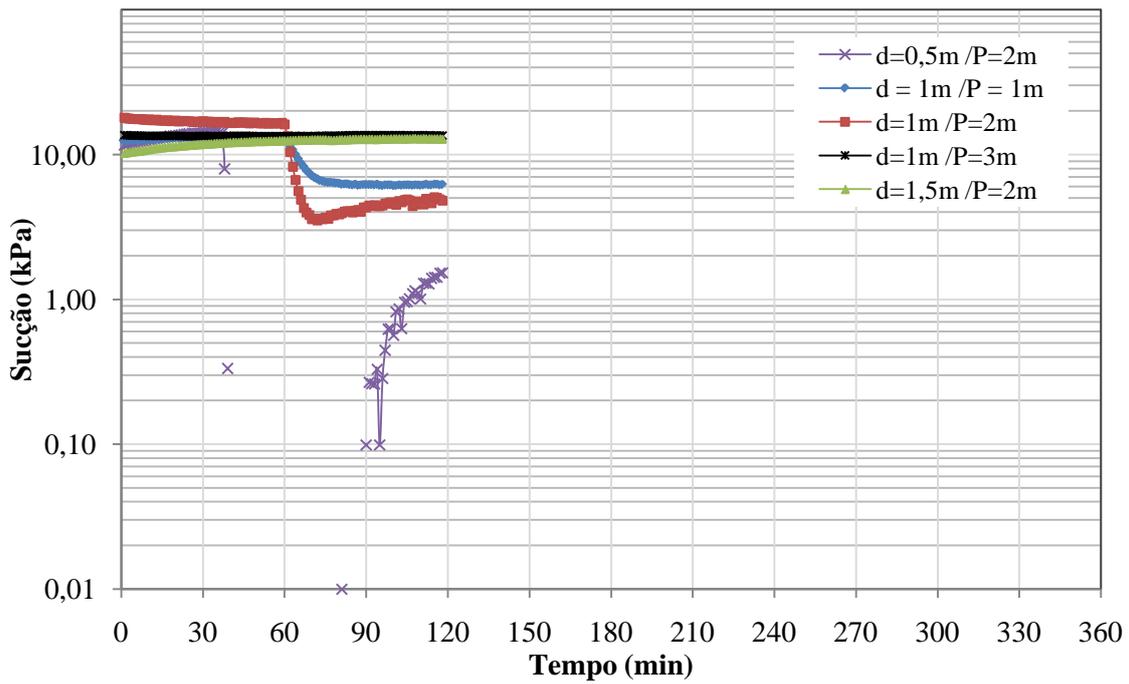
B16 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do terceiro ensaio de enchimento  
Trincheira 2.



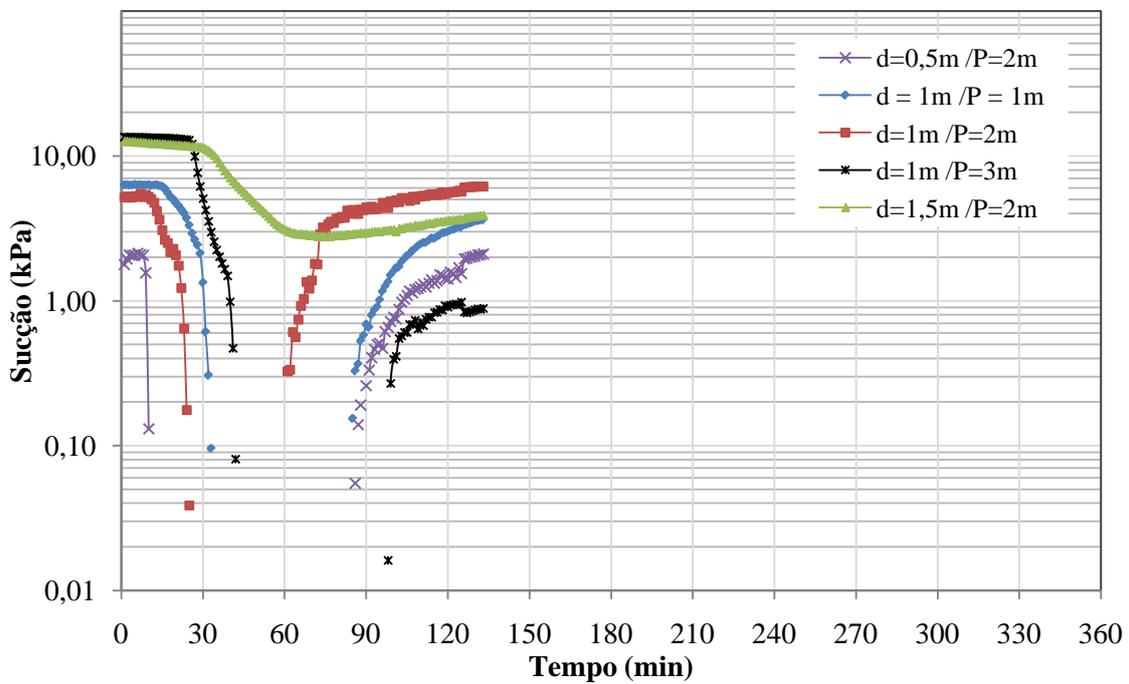
B17– Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do terceiro ensaio de enchimento Trincheira 3.



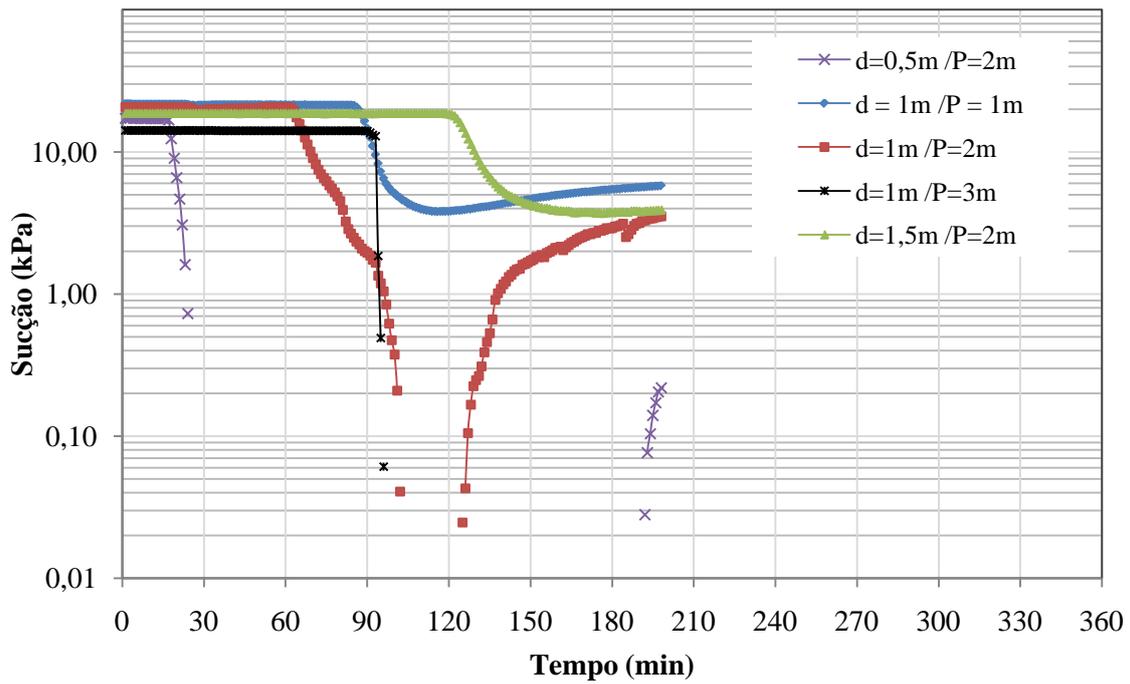
B18 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do terceiro ensaio de enchimento Trincheira 4.



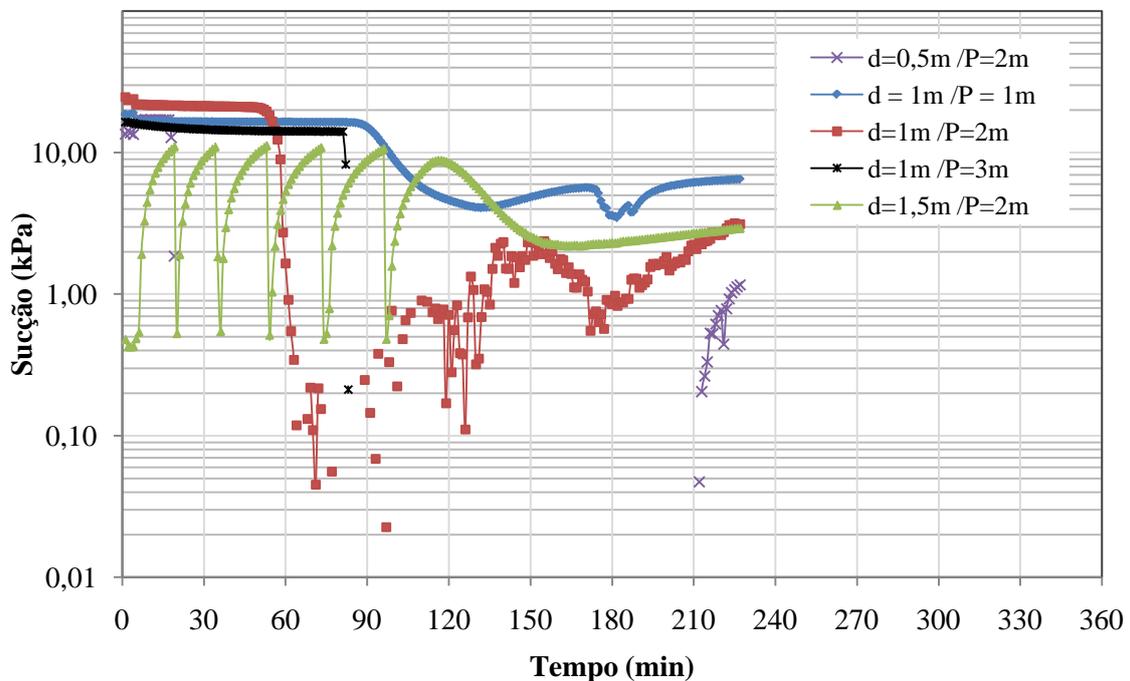
B19 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do terceiro ensaio de enchimento  
Trincheira 5.



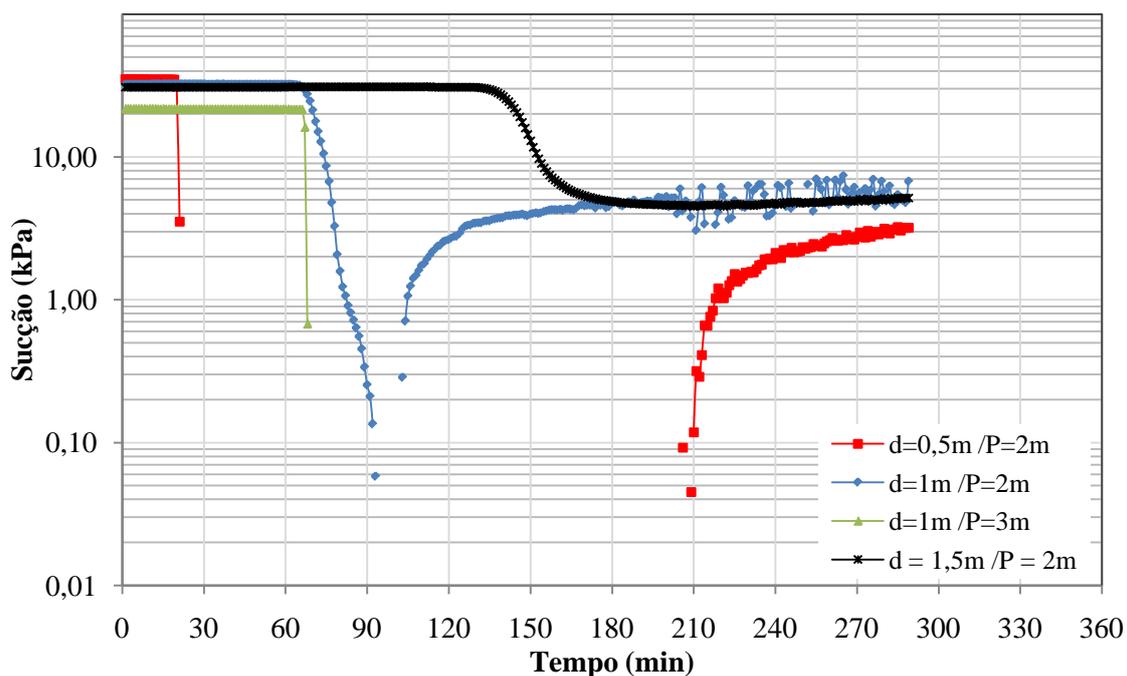
B20 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do terceiro ensaio de enchimento contínuo,  
Trincheira 5.



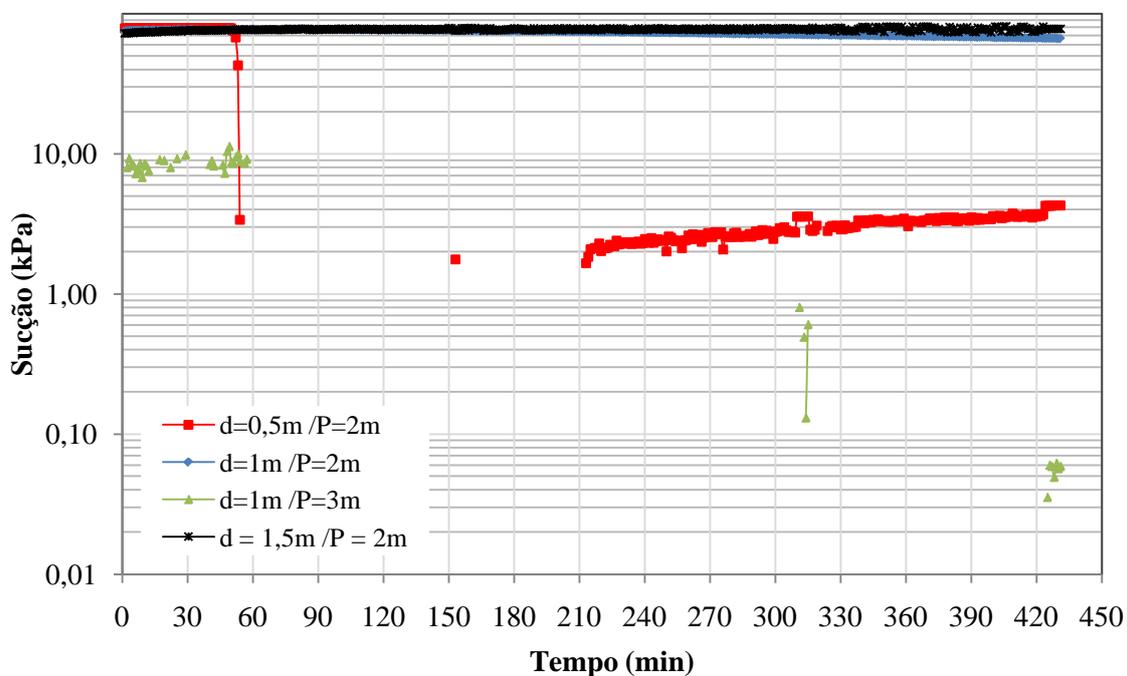
B21 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do terceiro ensaio de enchimento Trincheira 6.



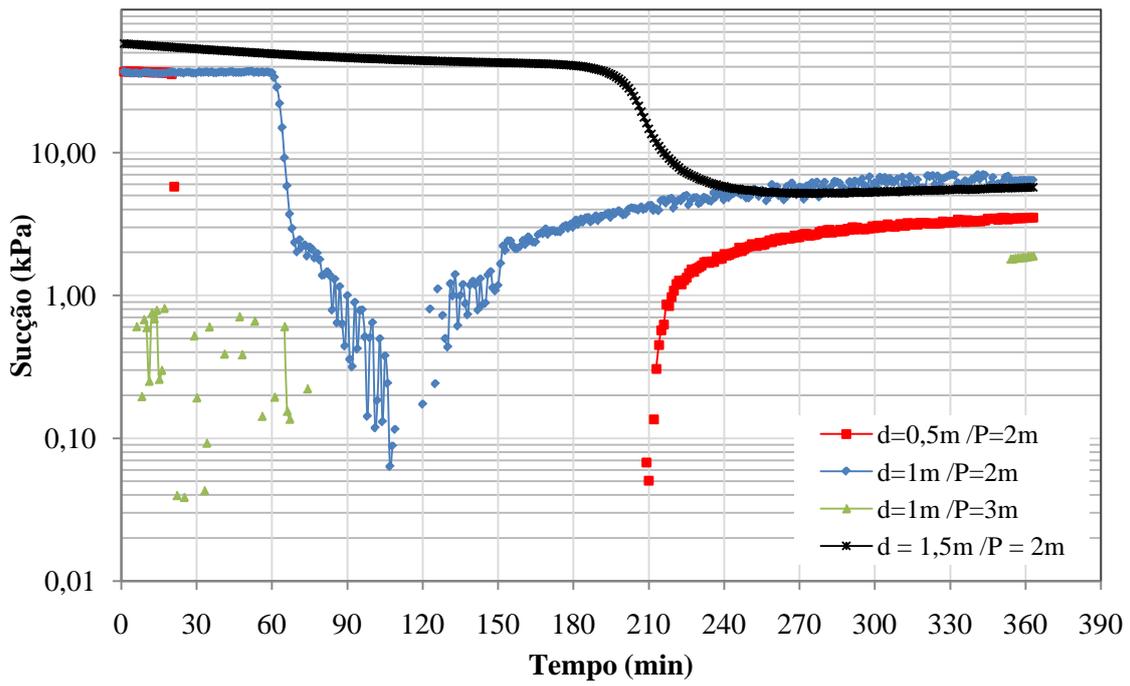
B22 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do terceiro ensaio de enchimento Trincheira 7.



B23 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do quarto ensaio de enchimento Trincheira 3.

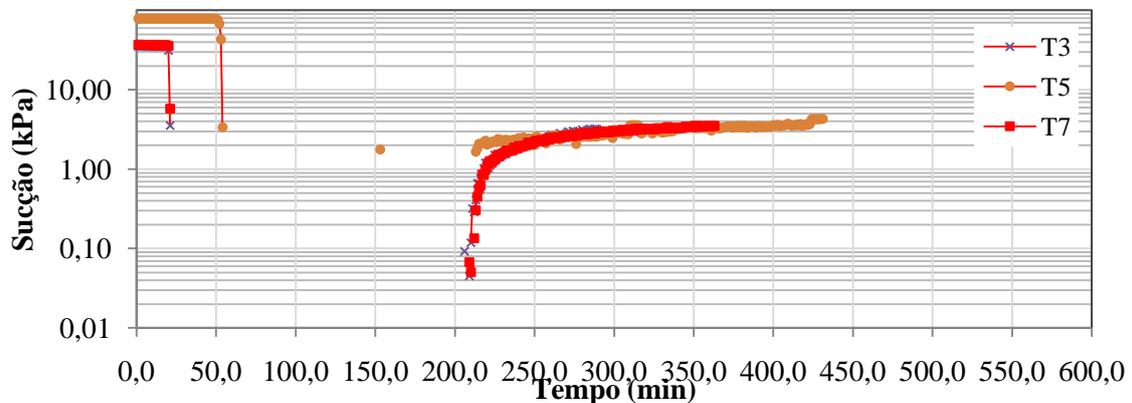
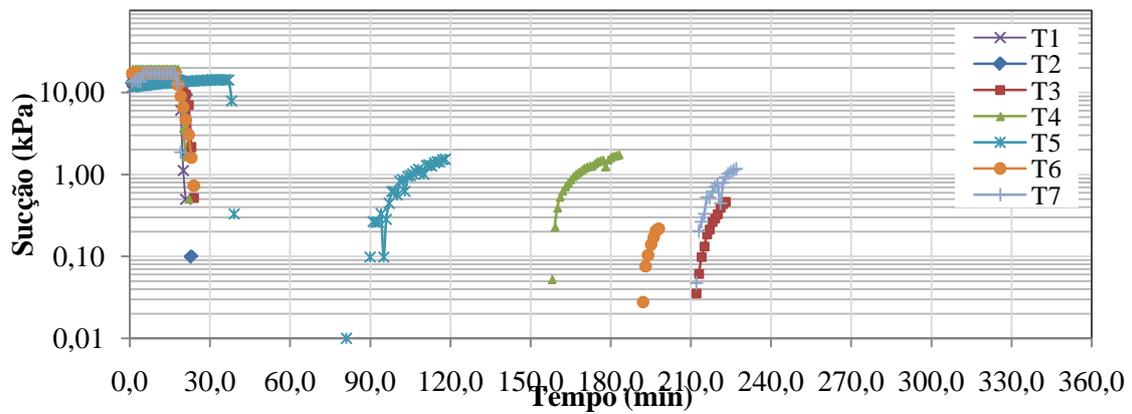
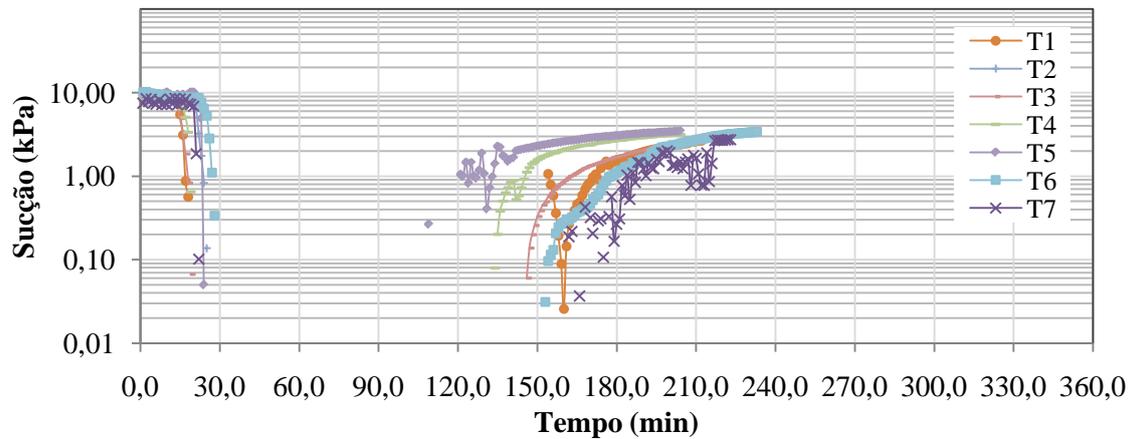
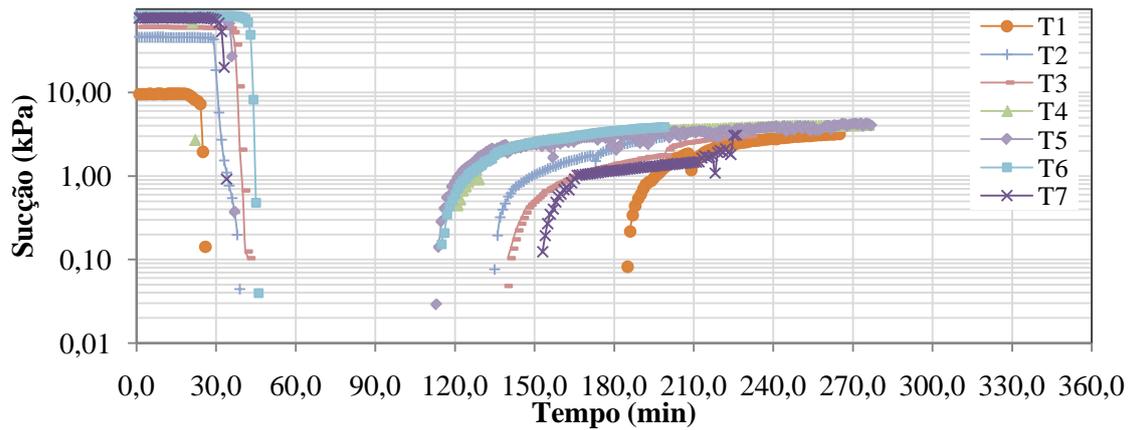


B24 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do quarto ensaio de enchimento Trincheira 5.

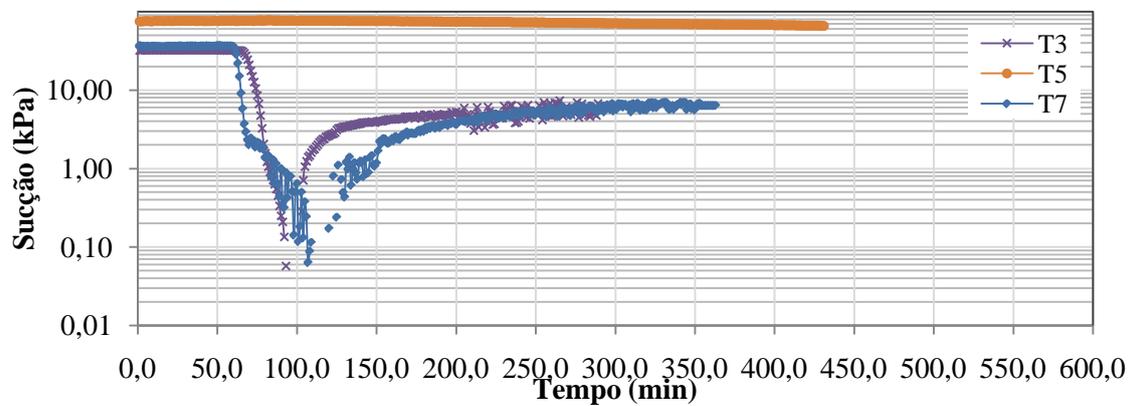
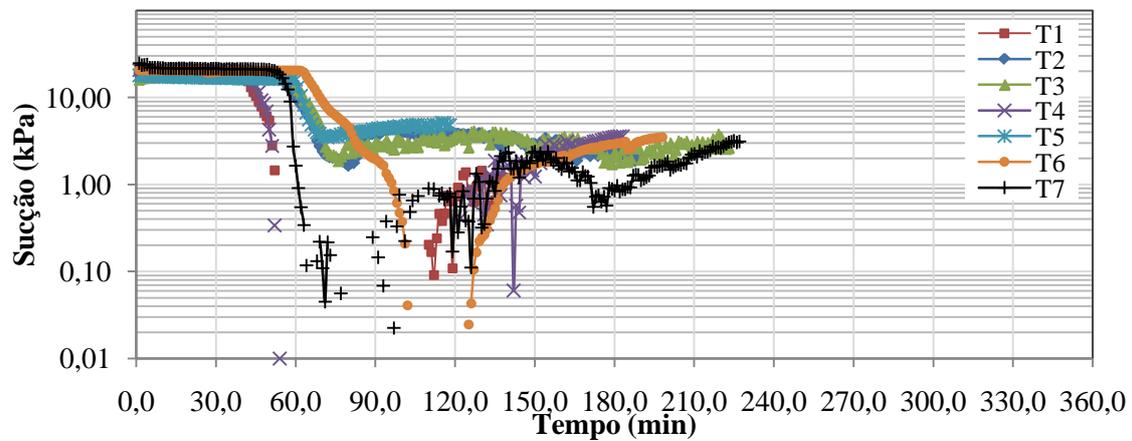
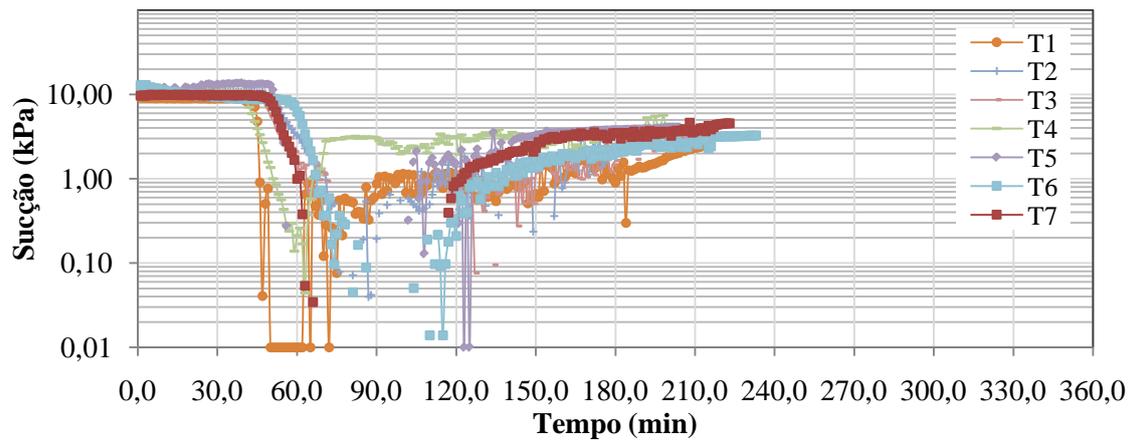
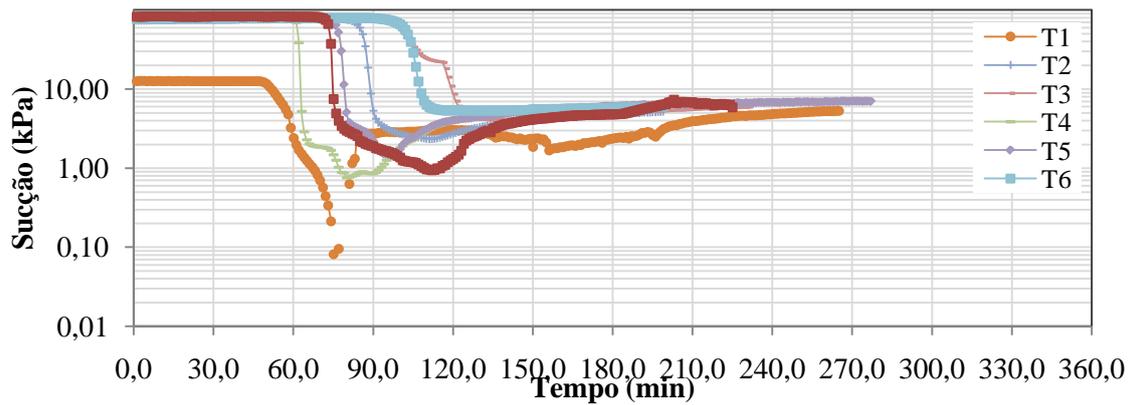


B25 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, do quarto ensaio de enchimento Trincheira

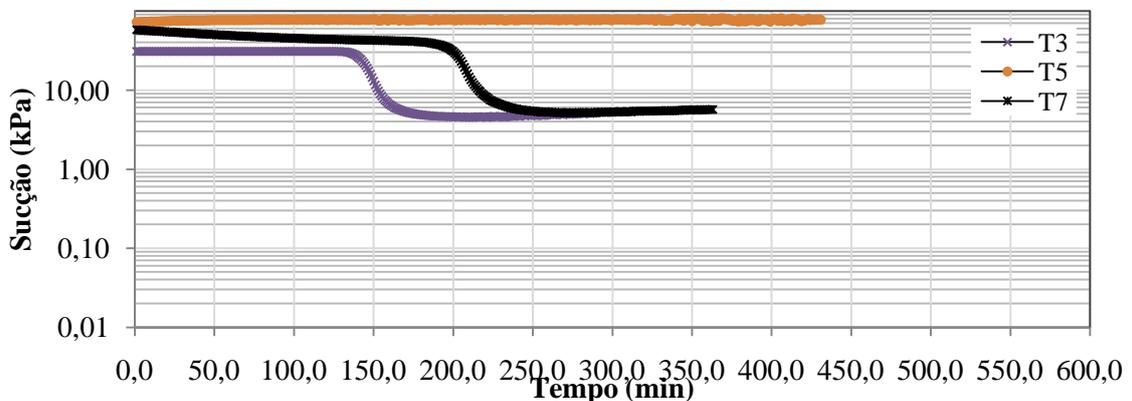
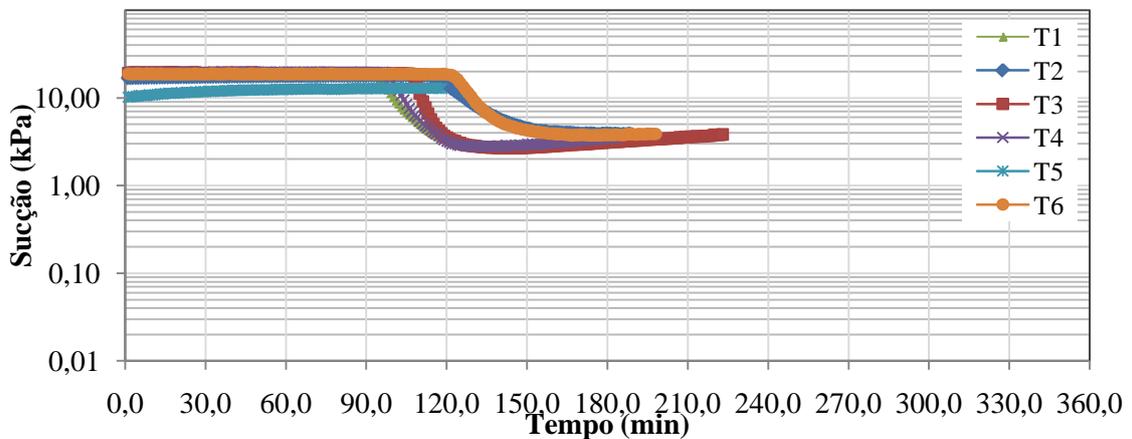
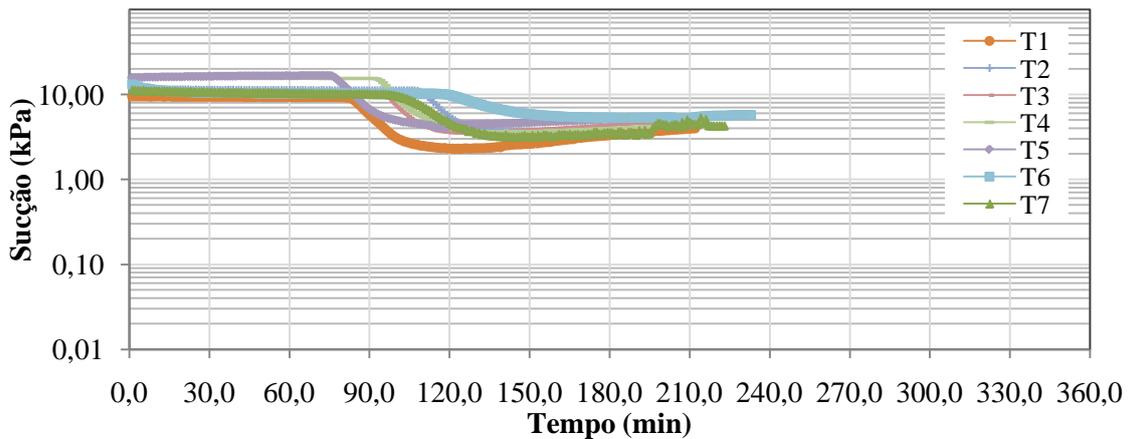
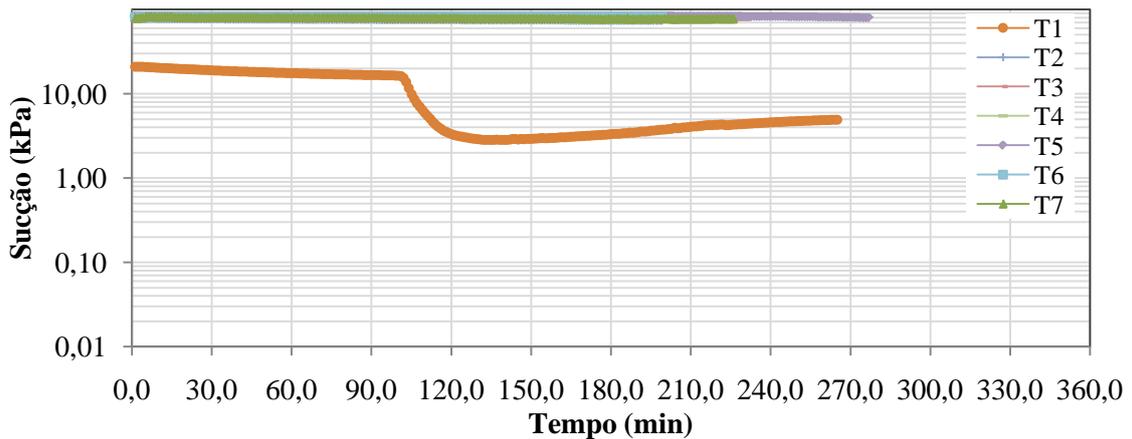
7.



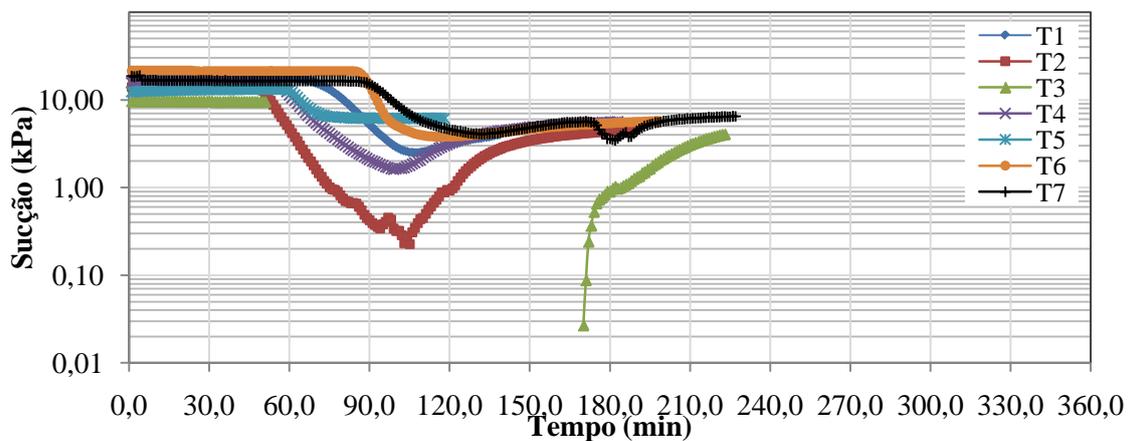
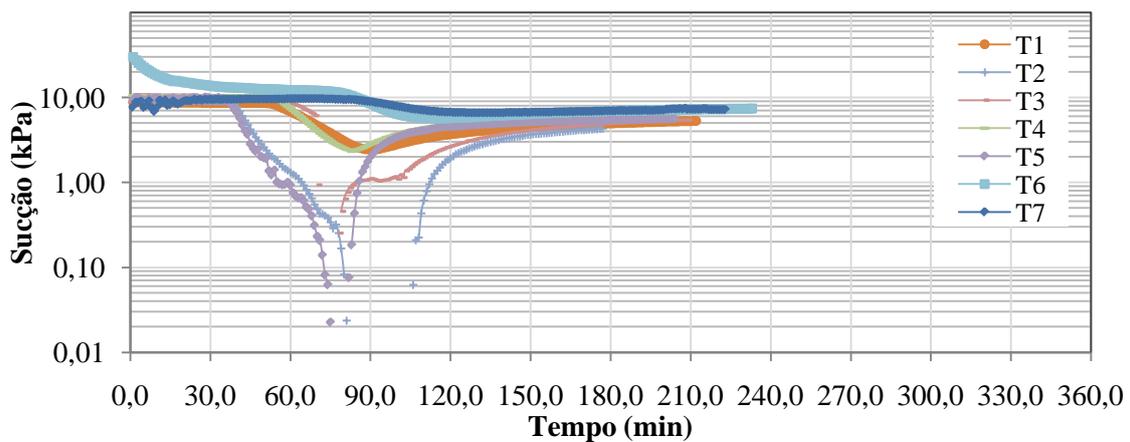
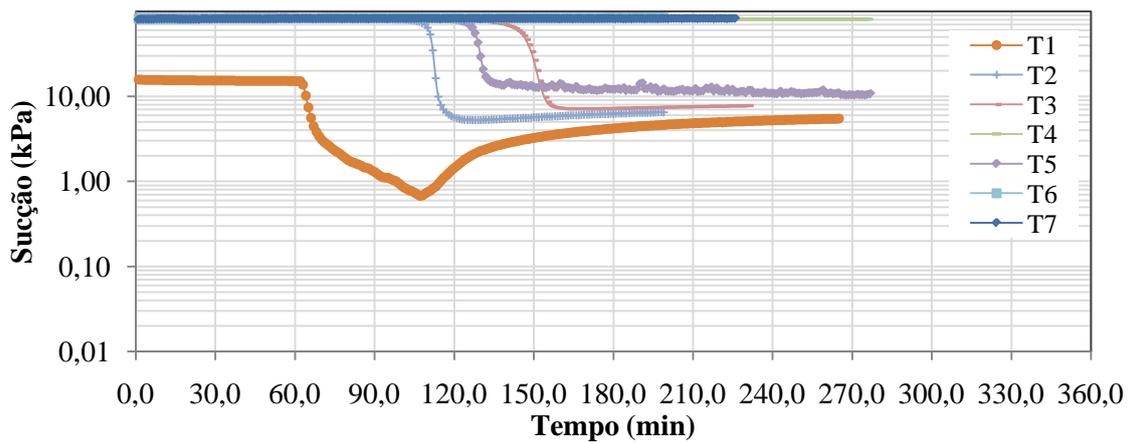
B26 – Tensiômetros distante 0,5m da trincheira na profundidade de 2,0m.



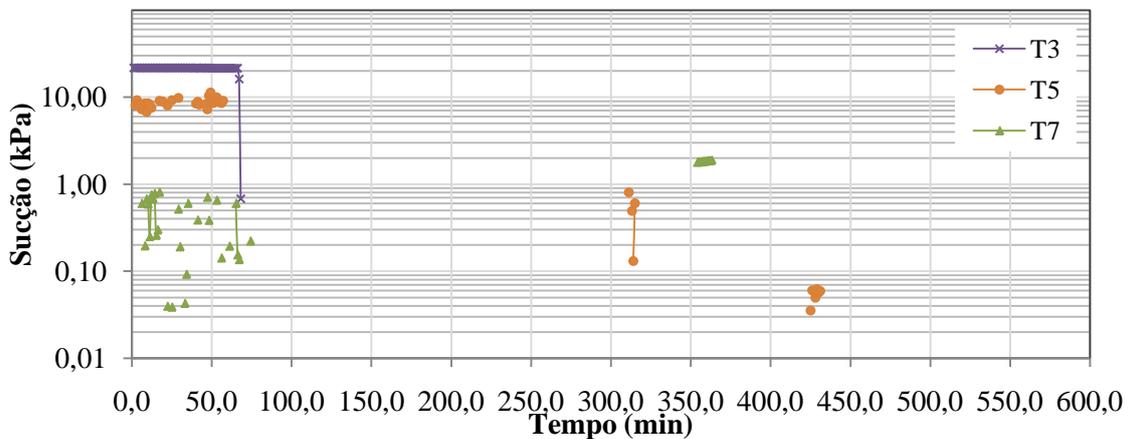
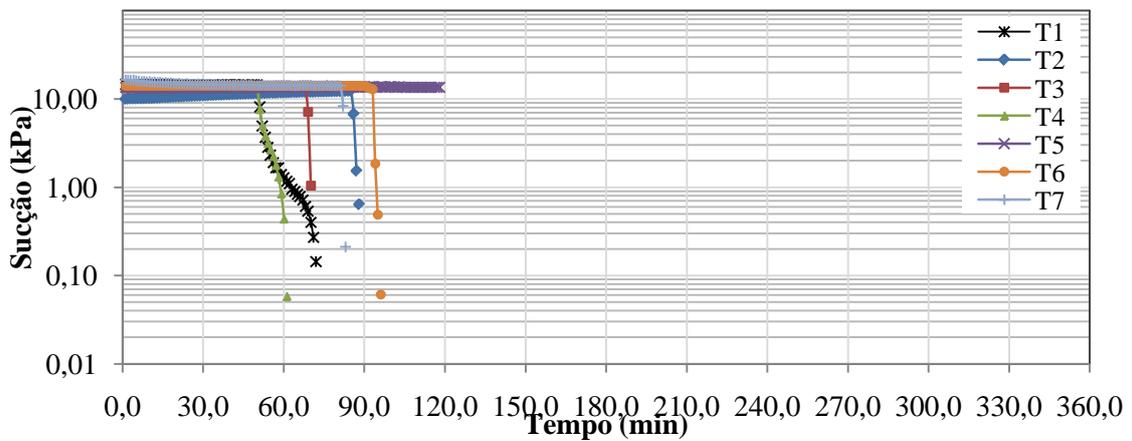
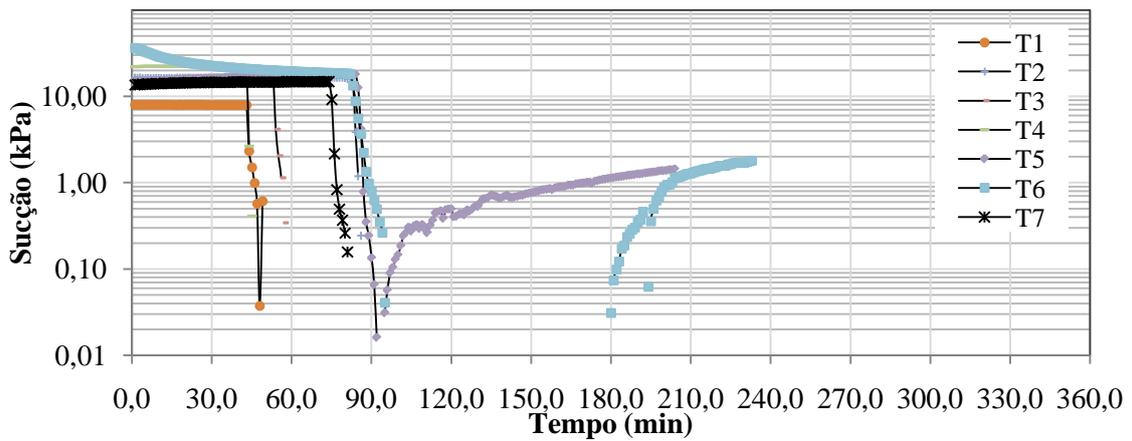
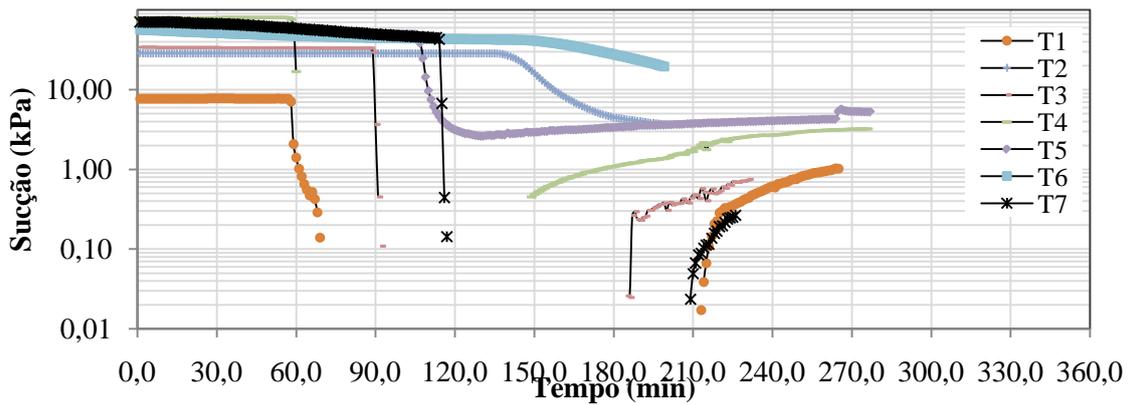
B27 - Tensiômetros distante 1,0m da trincheira na profundidade de 2,0m.



B28 – Tensiômetros distante 1,5m da trincheira na profundidade de 2,0m.



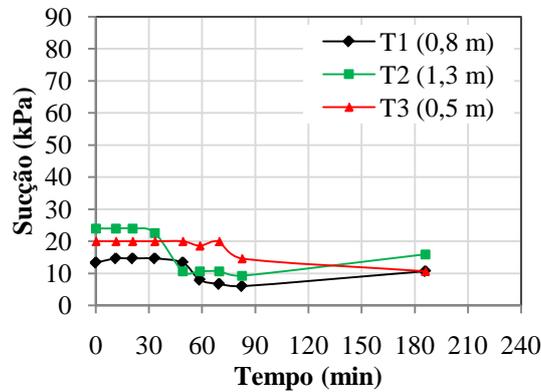
B29 – Tensiômetros distante 1,0m da trincheira na profundidade de 1,0m.



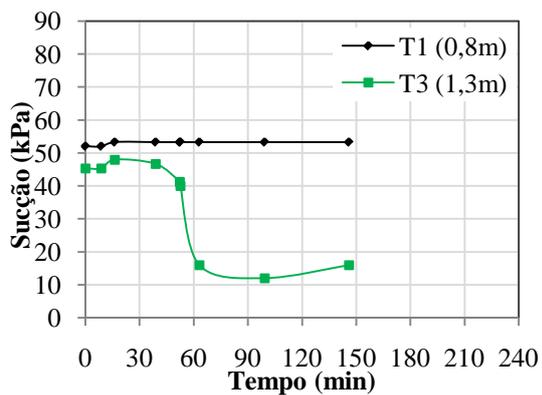
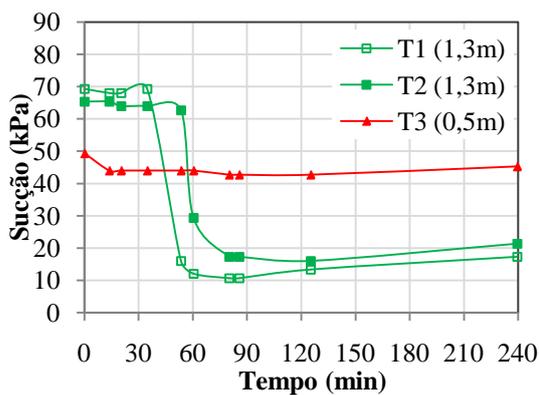
B30 – Tensiômetros distante 1,0m da trincheira na profundidade de 3,0m.

## ANEXO “C”

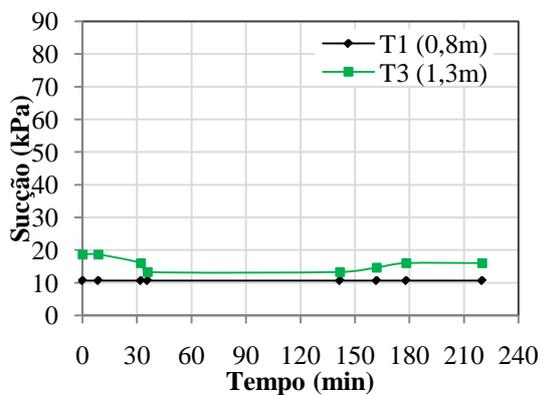
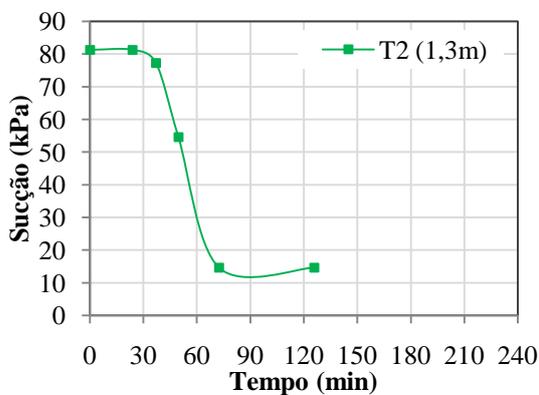
### Tensiômetros com Vacuômetro



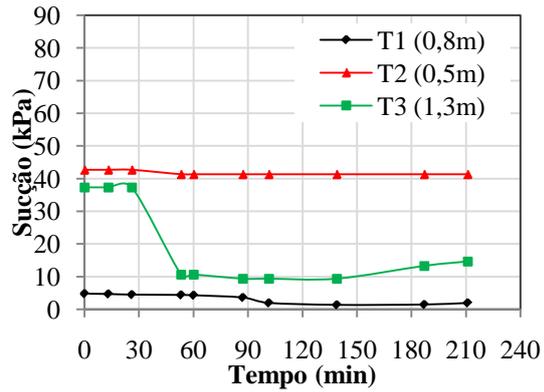
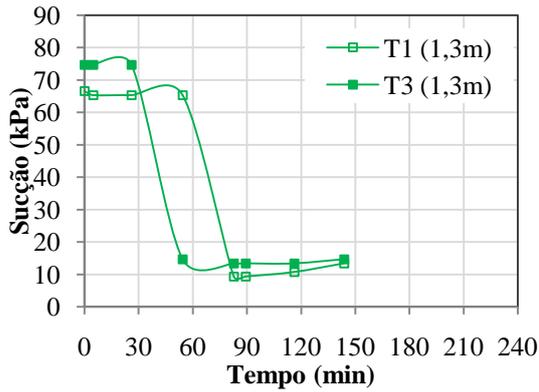
C1 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, primeiro ensaio de enchimento Trincheira 1.



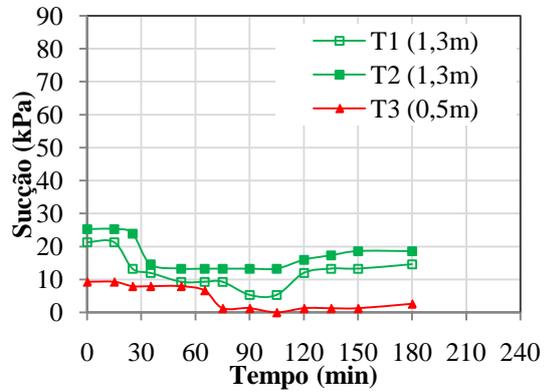
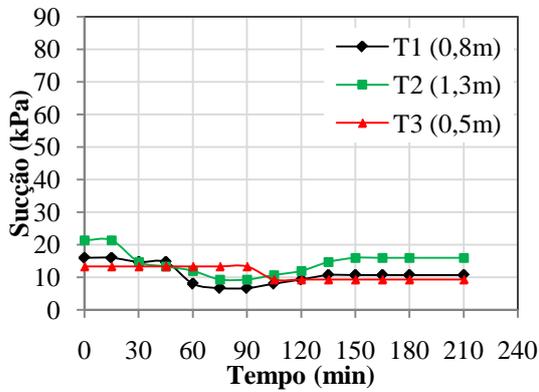
C2 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, primeiro ensaio de enchimento Trincheira 2 e 3.



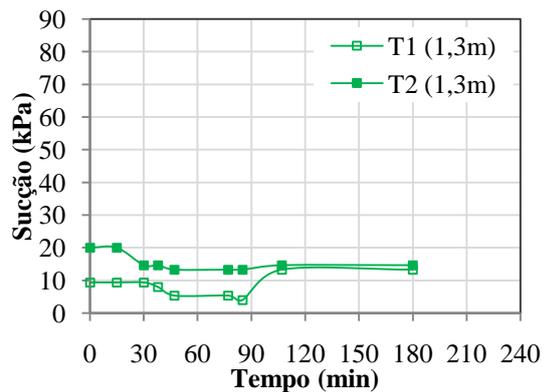
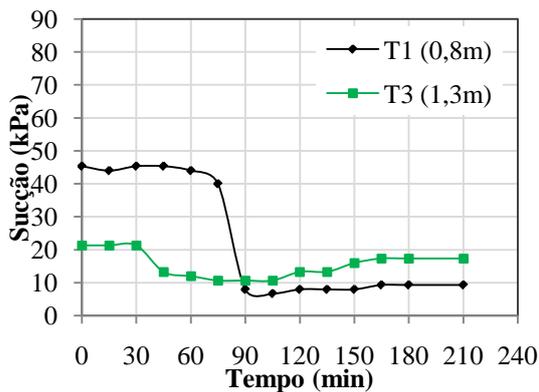
C3 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, primeiro ensaio de enchimento Trincheira 4 e 5.



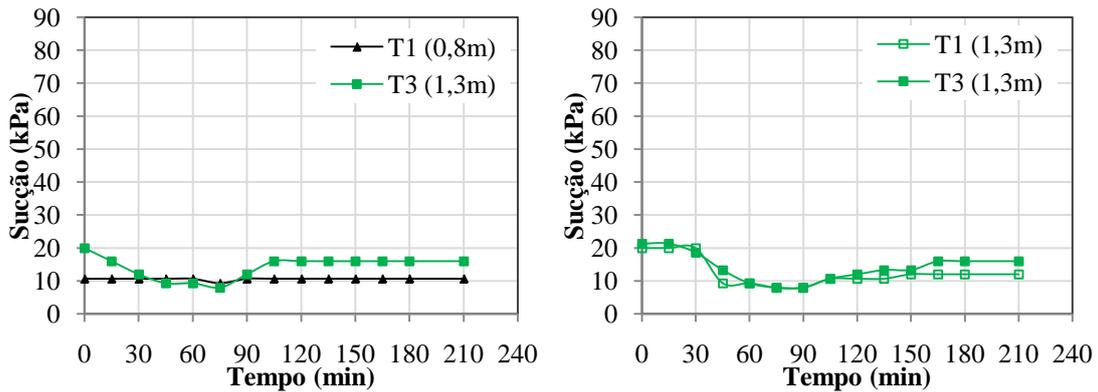
C4 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, primeiro ensaio de enchimento Trincheira 6 e 7, respectivamente.



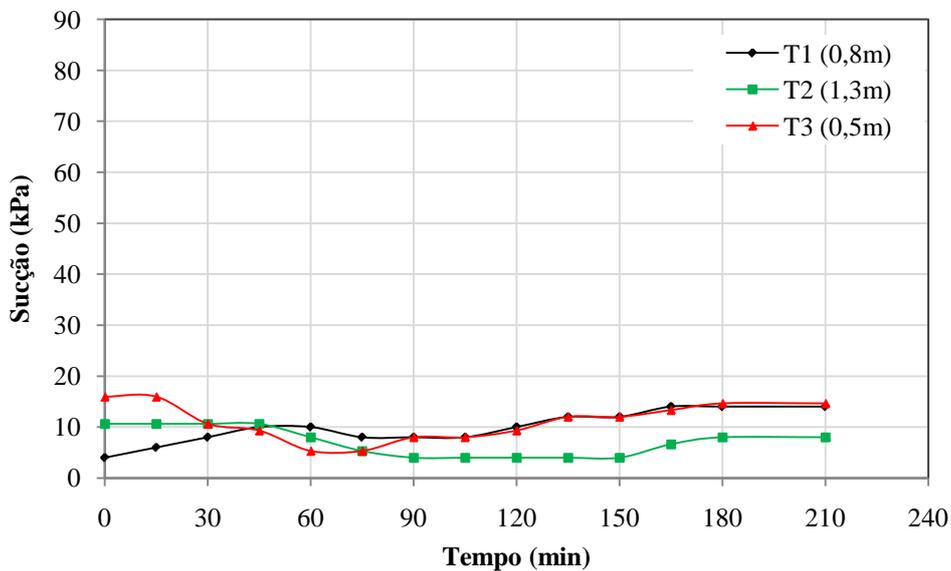
C5 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, segundo ensaio de enchimento Trincheira 1 e 2, respectivamente.



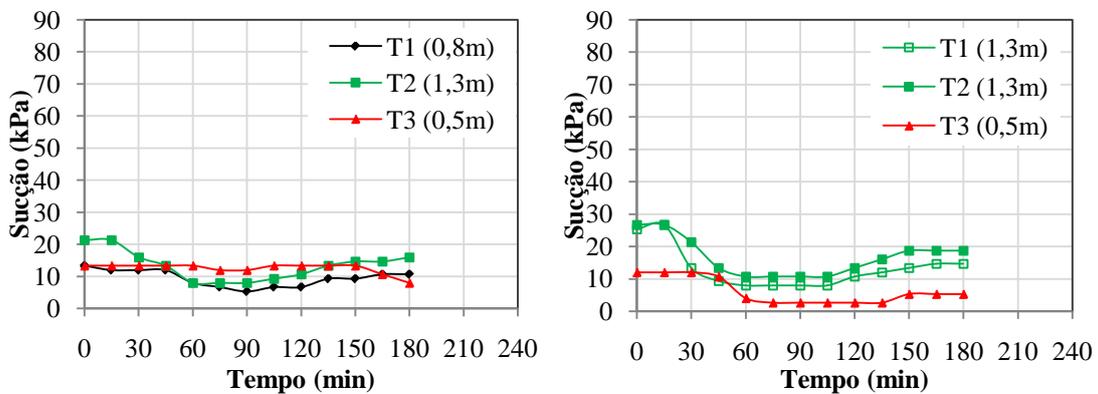
C6 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, segundo ensaio de enchimento Trincheira 3 e 4, respectivamente.



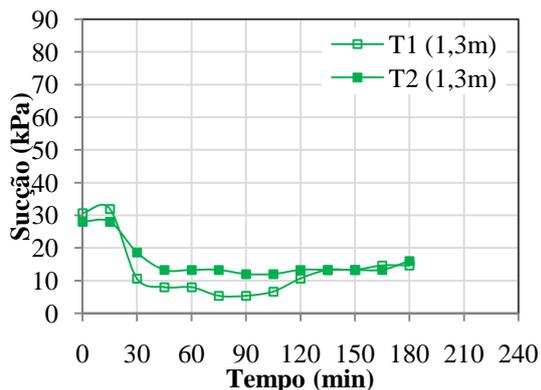
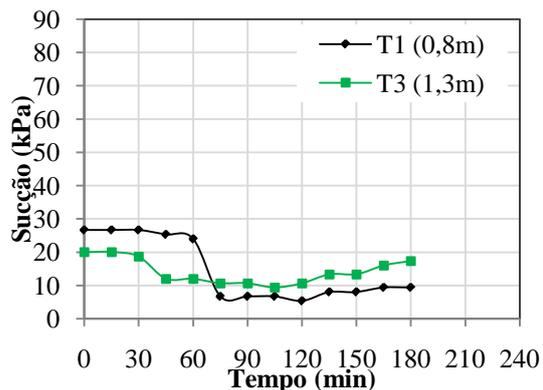
C7 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, segundo ensaio de enchimento Trincheira 5 e 6, respectivamente.



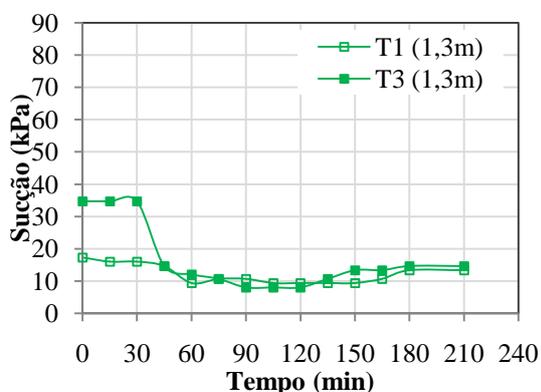
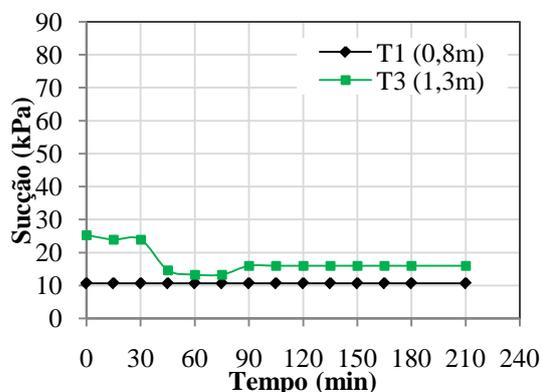
C8 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, segundo ensaio de enchimento Trincheira 7.



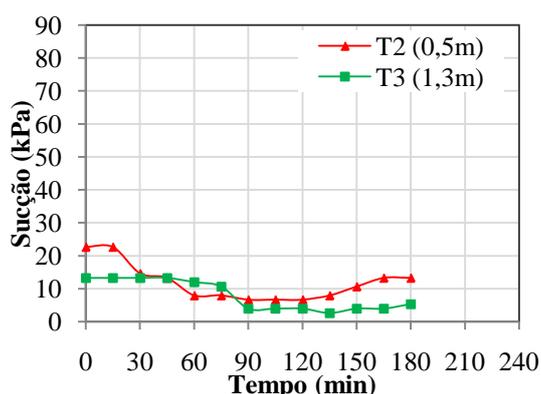
C9 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, terceiro ensaio de enchimento Trincheira 1 e 2, respectivamente.



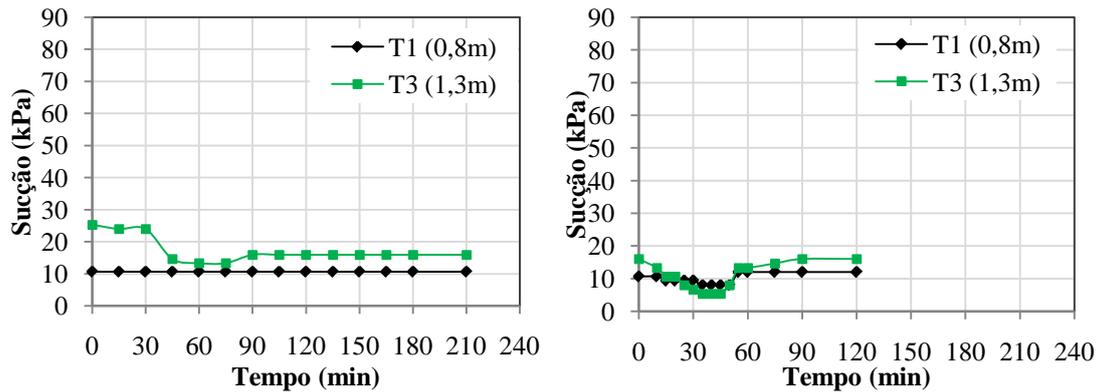
C10 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, terceiro ensaio de enchimento Trincheira 3 e 4, respectivamente.



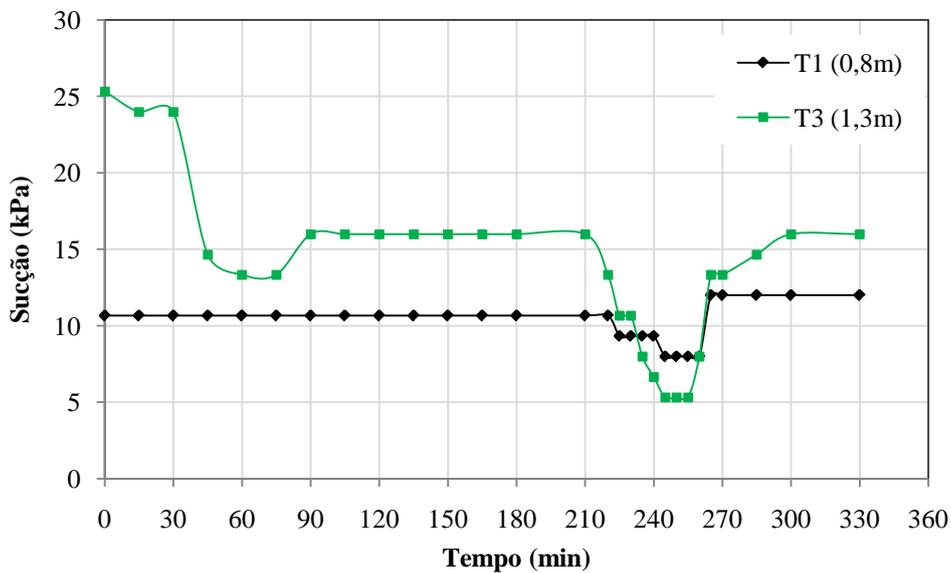
C11 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, terceiro ensaio de enchimento Trincheira 5 e 6, respectivamente.



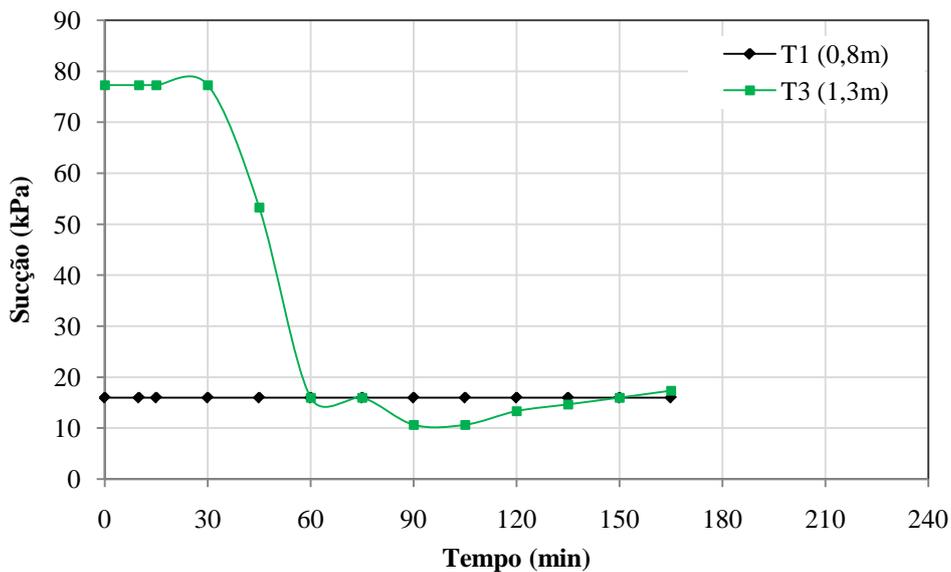
C12 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, terceiro ensaio de enchimento Trincheira 7.



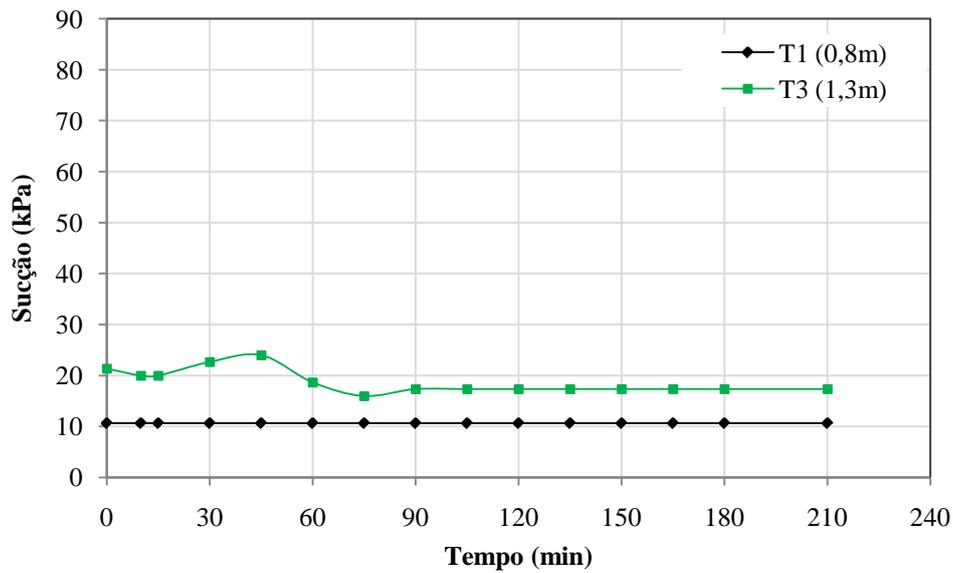
C13 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, ensaio contínuo de enchimento Trincheira 5, (a) 10.000 litros de enchimento (b) 10.000 litros de enchimento contínuo.



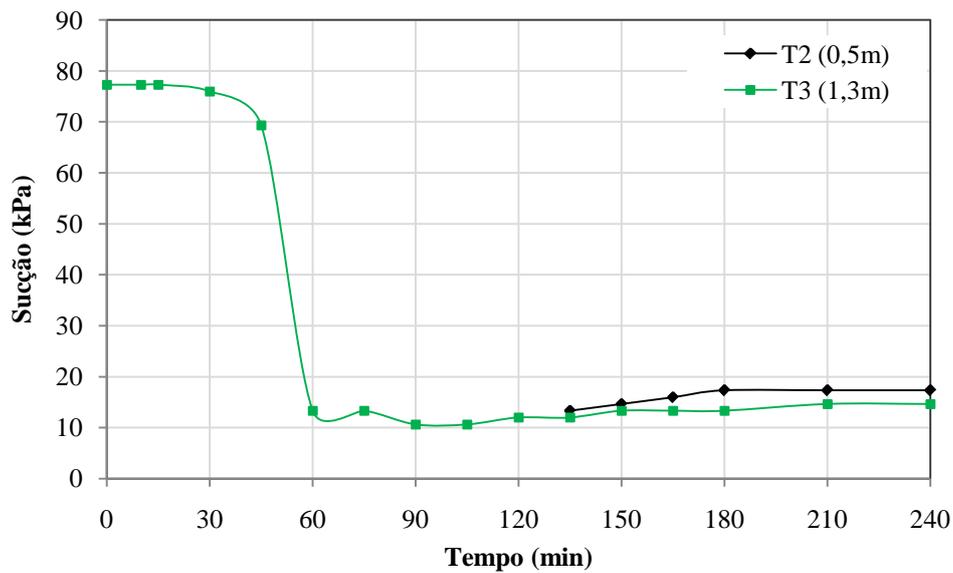
C14 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, ensaio contínuo de enchimento Trincheira 5.



C15 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, quarto ensaio de enchimento Trincheira 3.



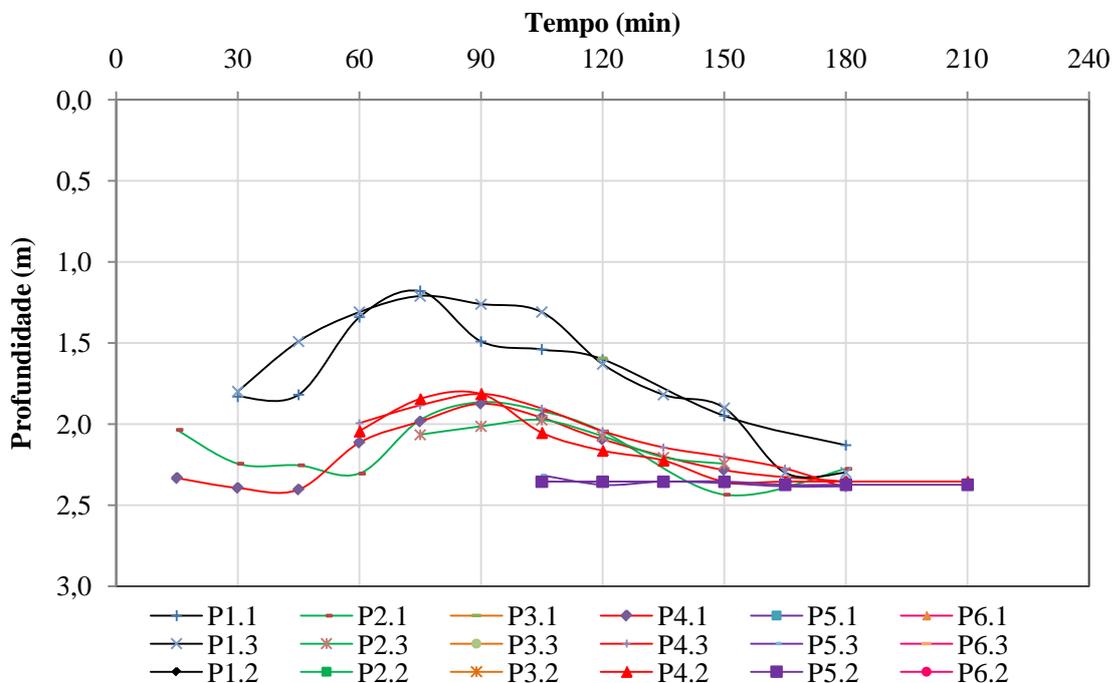
C16 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, quarto ensaio de enchimento Trincheira 5.



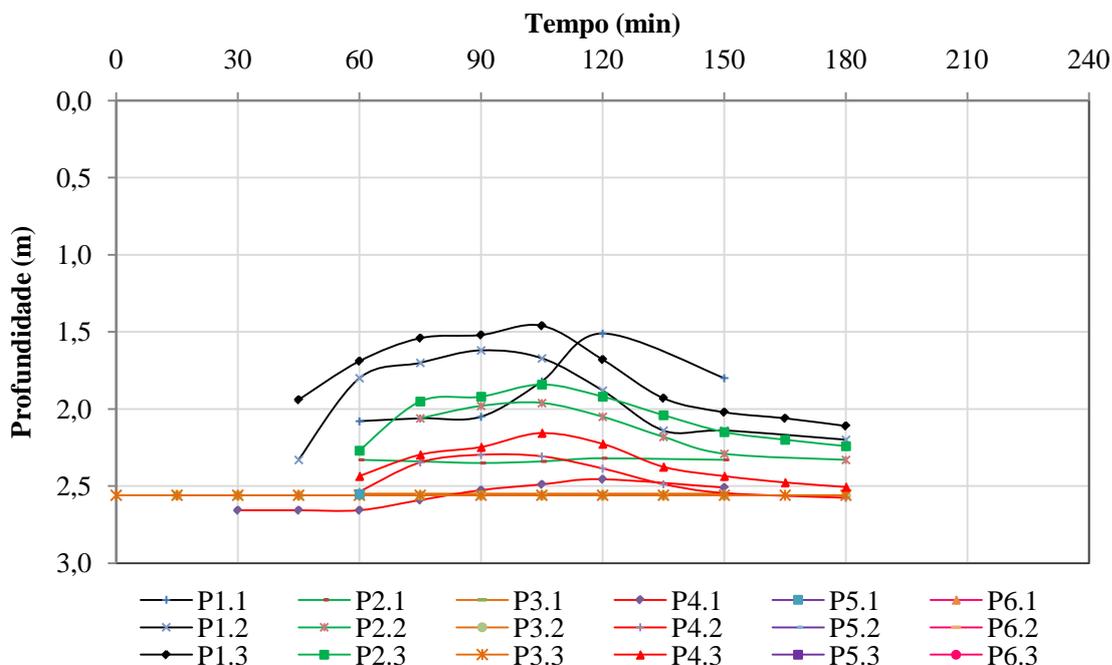
C17 – Gráfico dos tensiômetros: Sucção x Tempo, quarto ensaio de enchimento Trincheira 7.

## ANEXO “D”

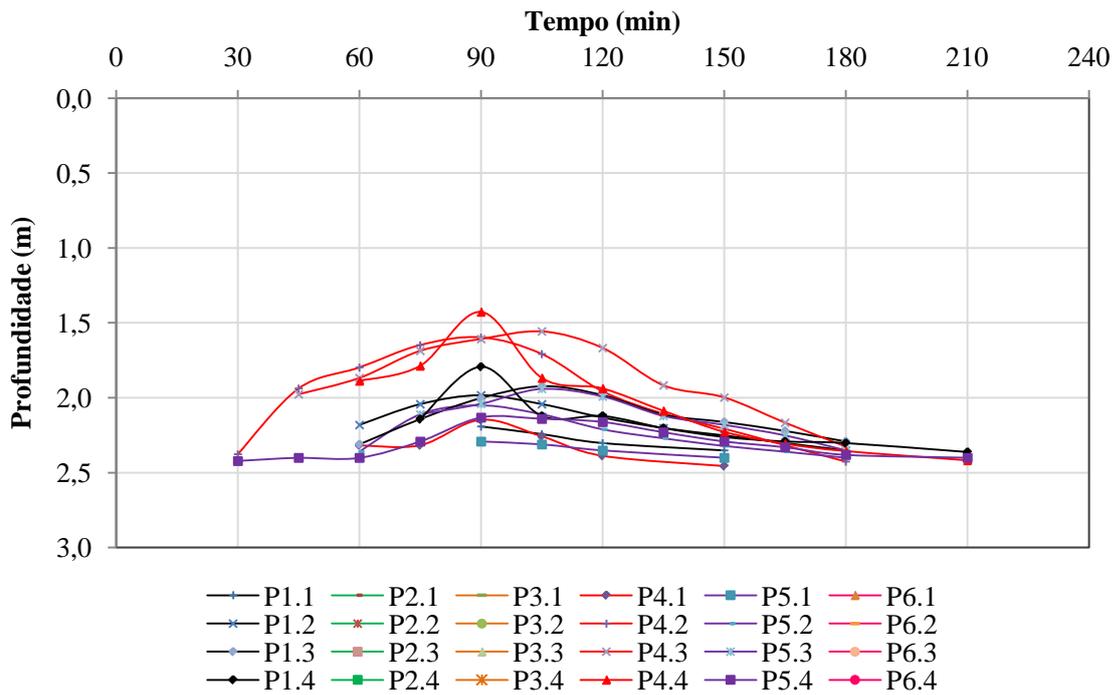
### Piezômetros



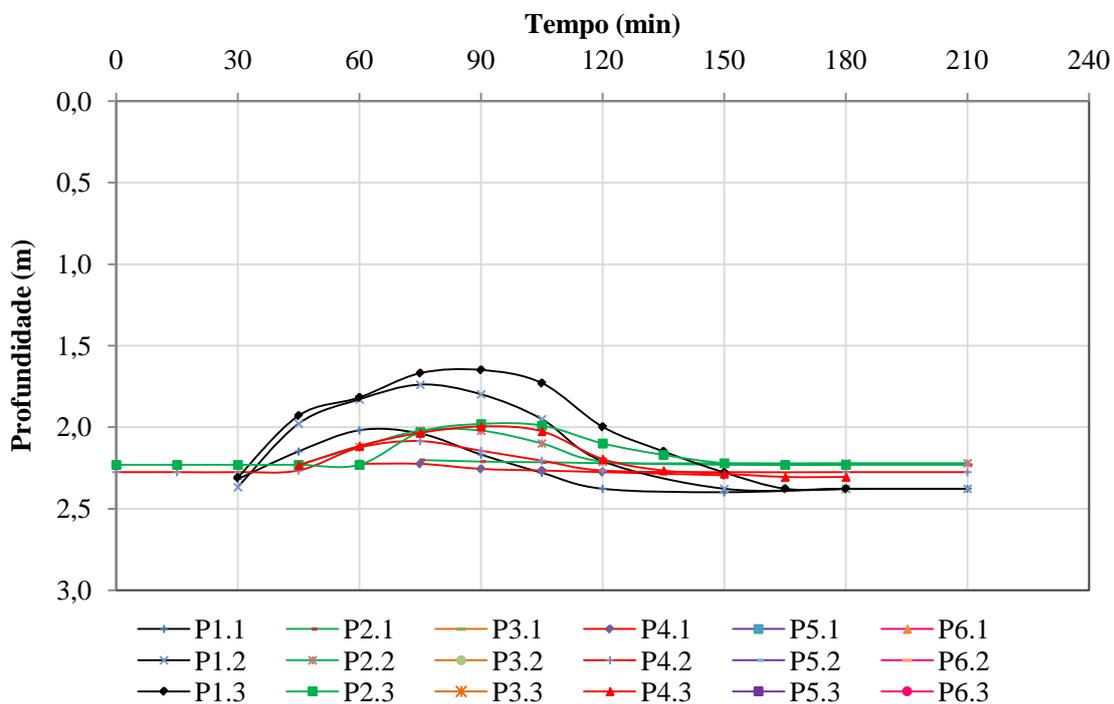
D1 – Gráfico Piezômetro: Profundidade x Tempo, Trincheira 1.



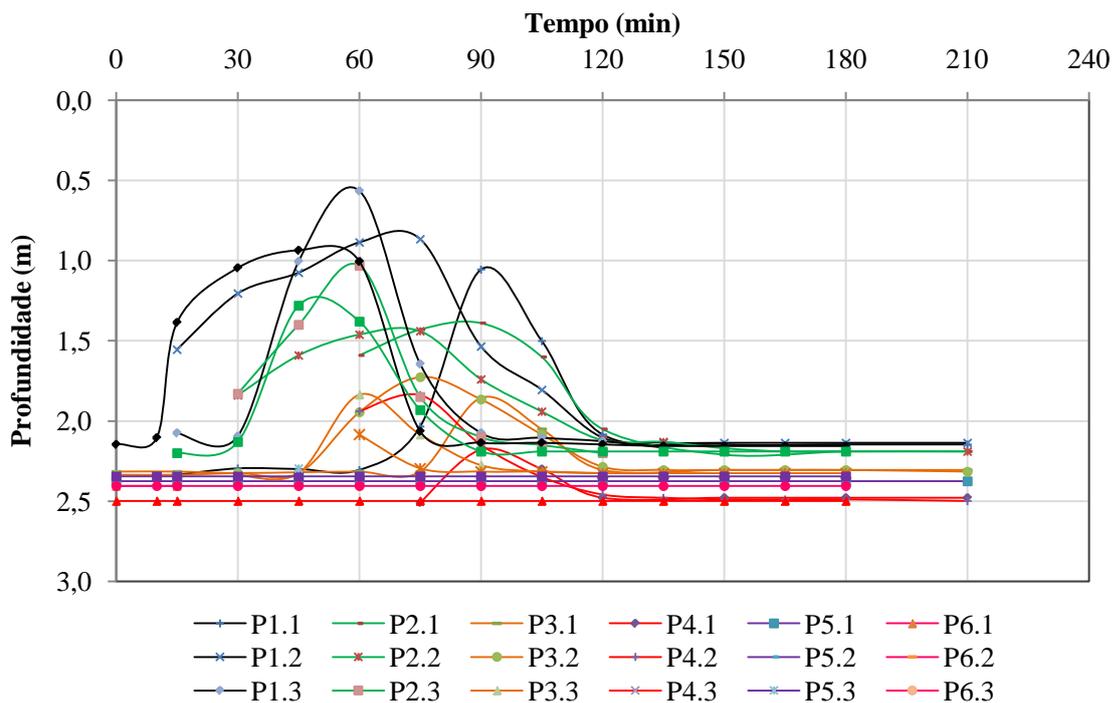
D2 – Gráfico Piezômetro: Profundidade x Tempo, Trincheira 2.



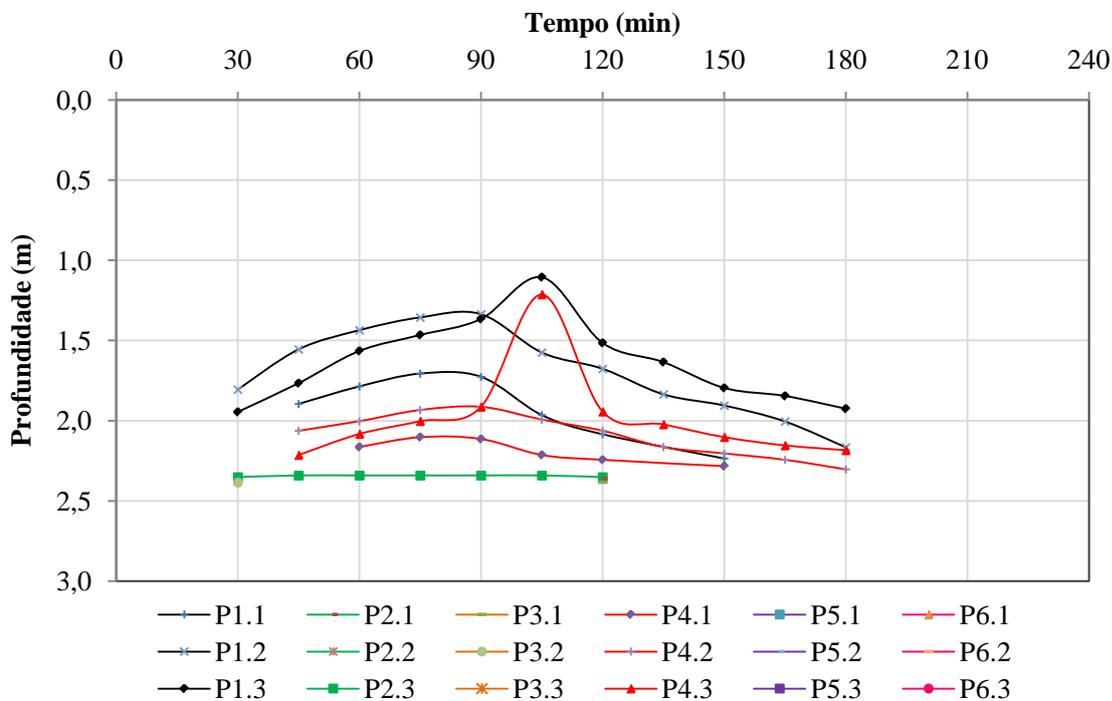
D3 – Gráfico Piezômetro: Profundidade x Tempo, Trincheira 3.



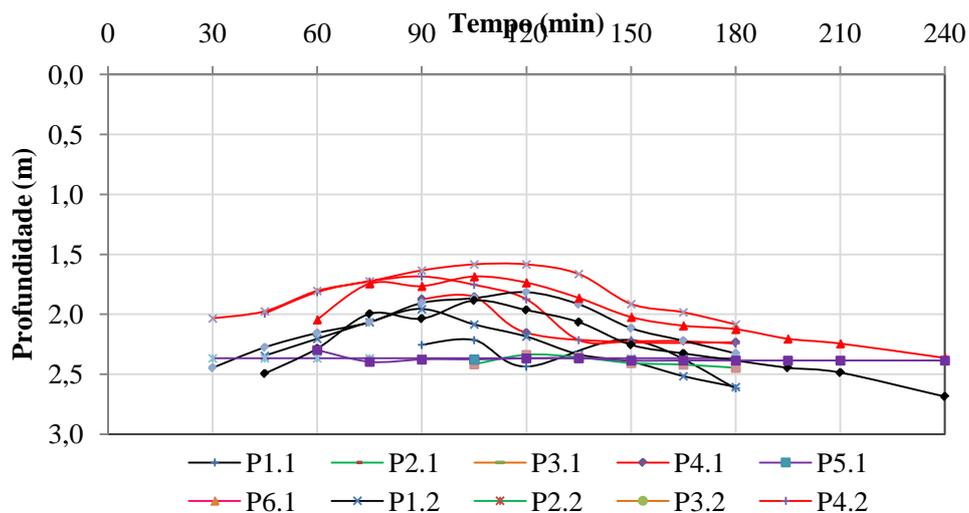
D4 – Gráfico Piezômetro: Profundidade x Tempo, Trincheira 4.



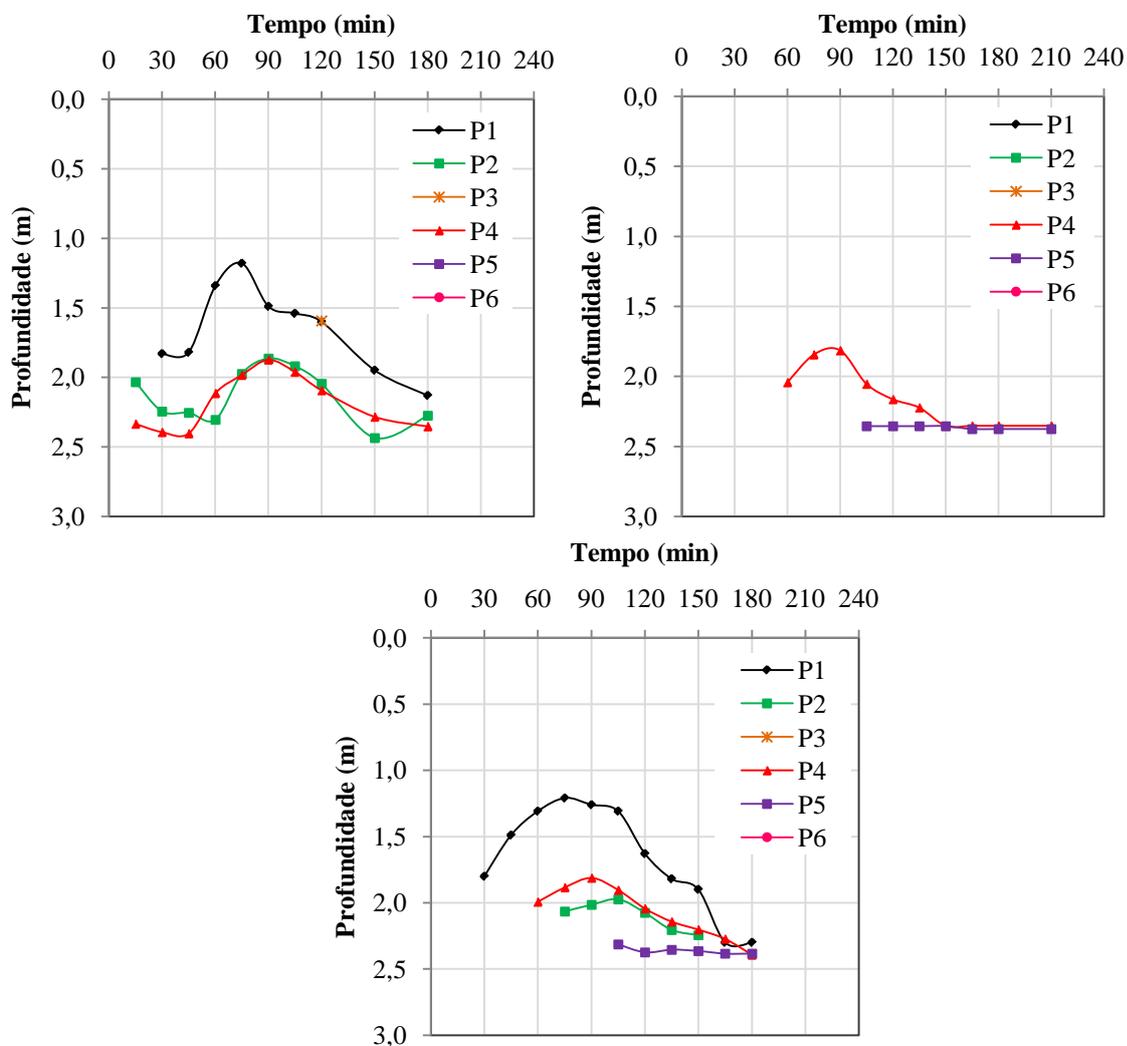
D5 – Gráfico Piezômetro: Profundidade x Tempo, Trincheira 5.



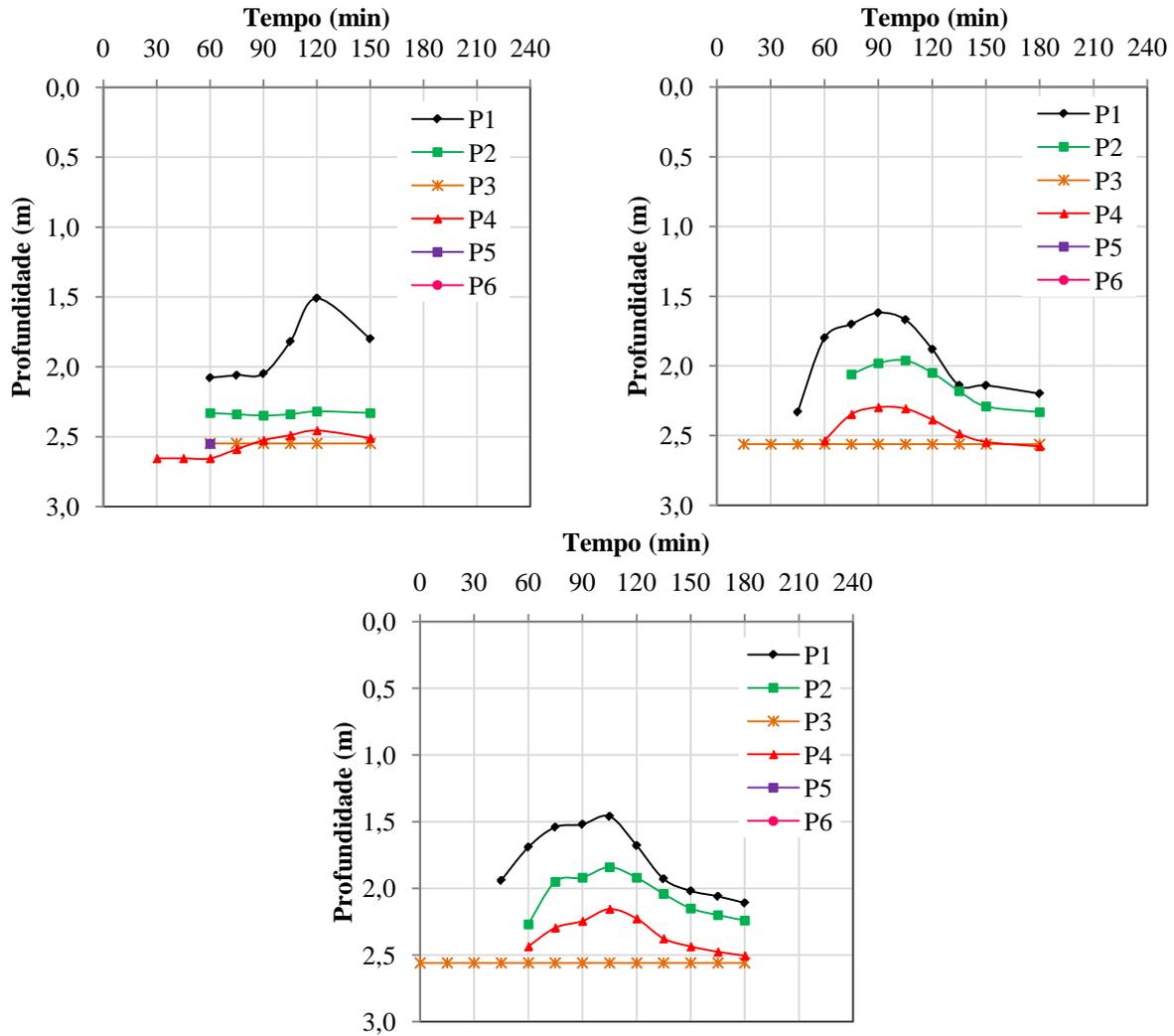
D6 – Gráfico Piezômetro: Profundidade x Tempo, Trincheira 6.



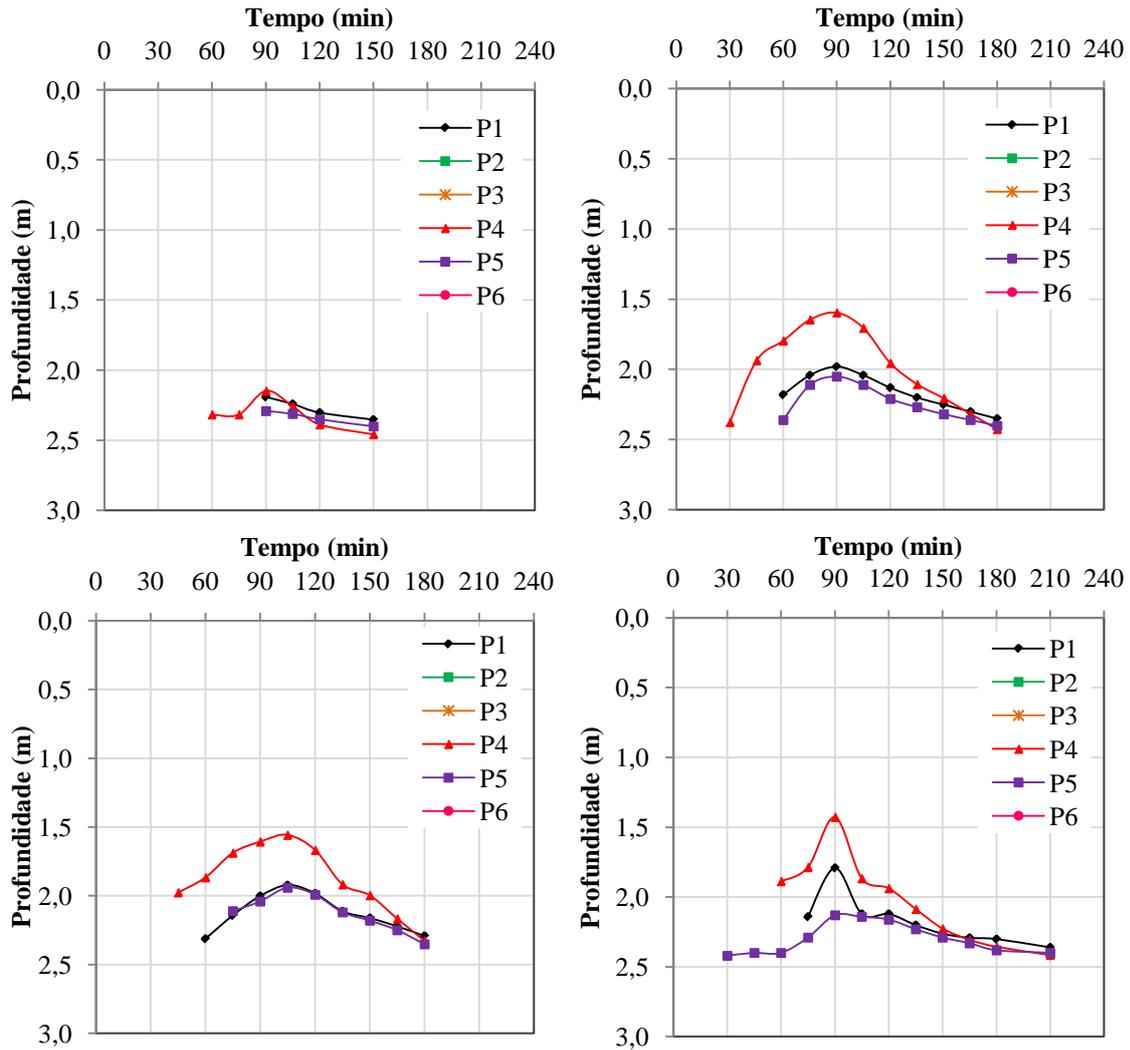
D7 – Gráfico Piezômetro: Profundidade x Tempo, Trincheira 7.



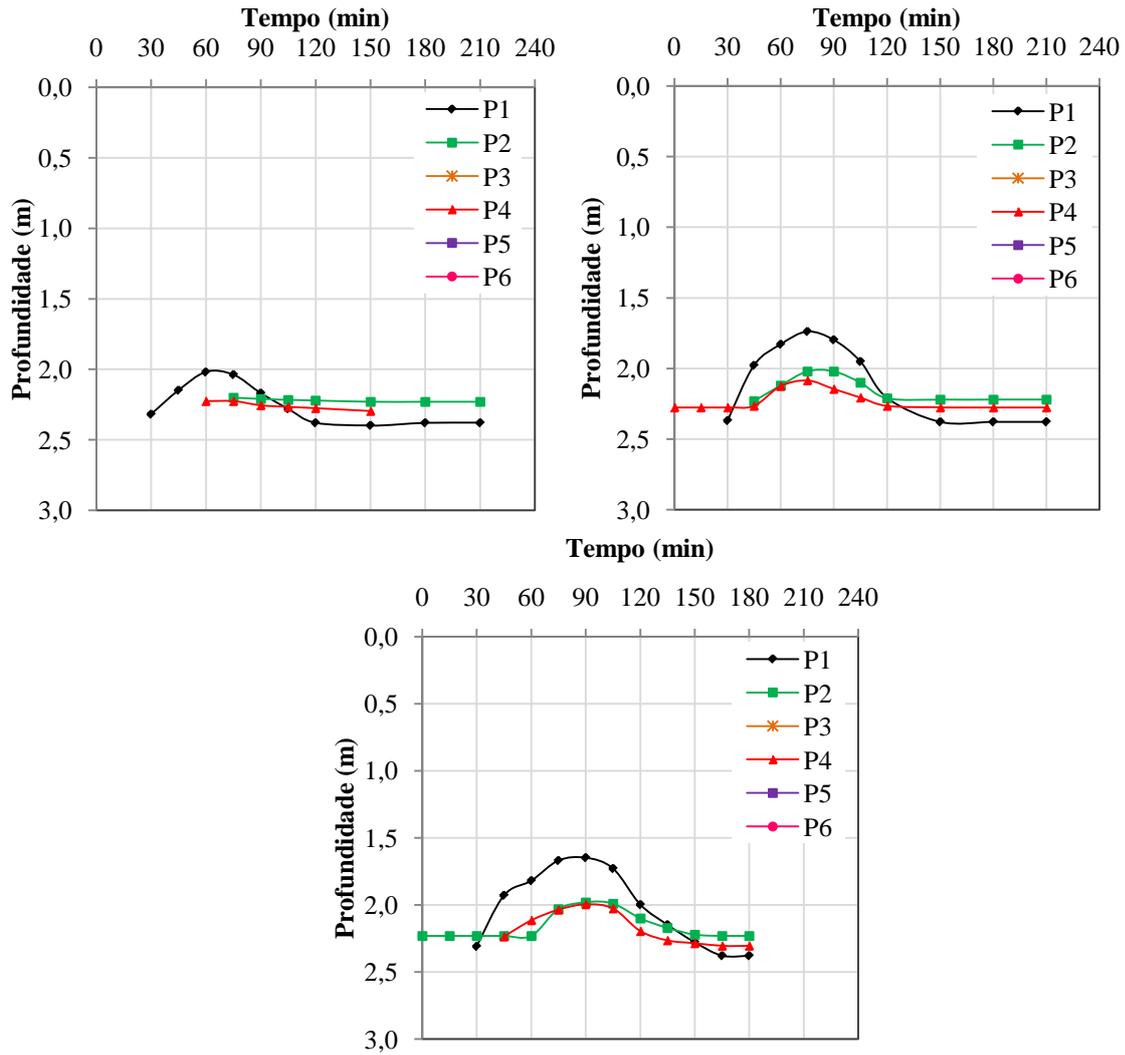
D8 – Gráfico Piezômetro: Profundidade x Tempo, Trincheira 1: a) 1ª etapa, b) 2ª etapa e c) 3ª etapa de ensaios de enchimento.



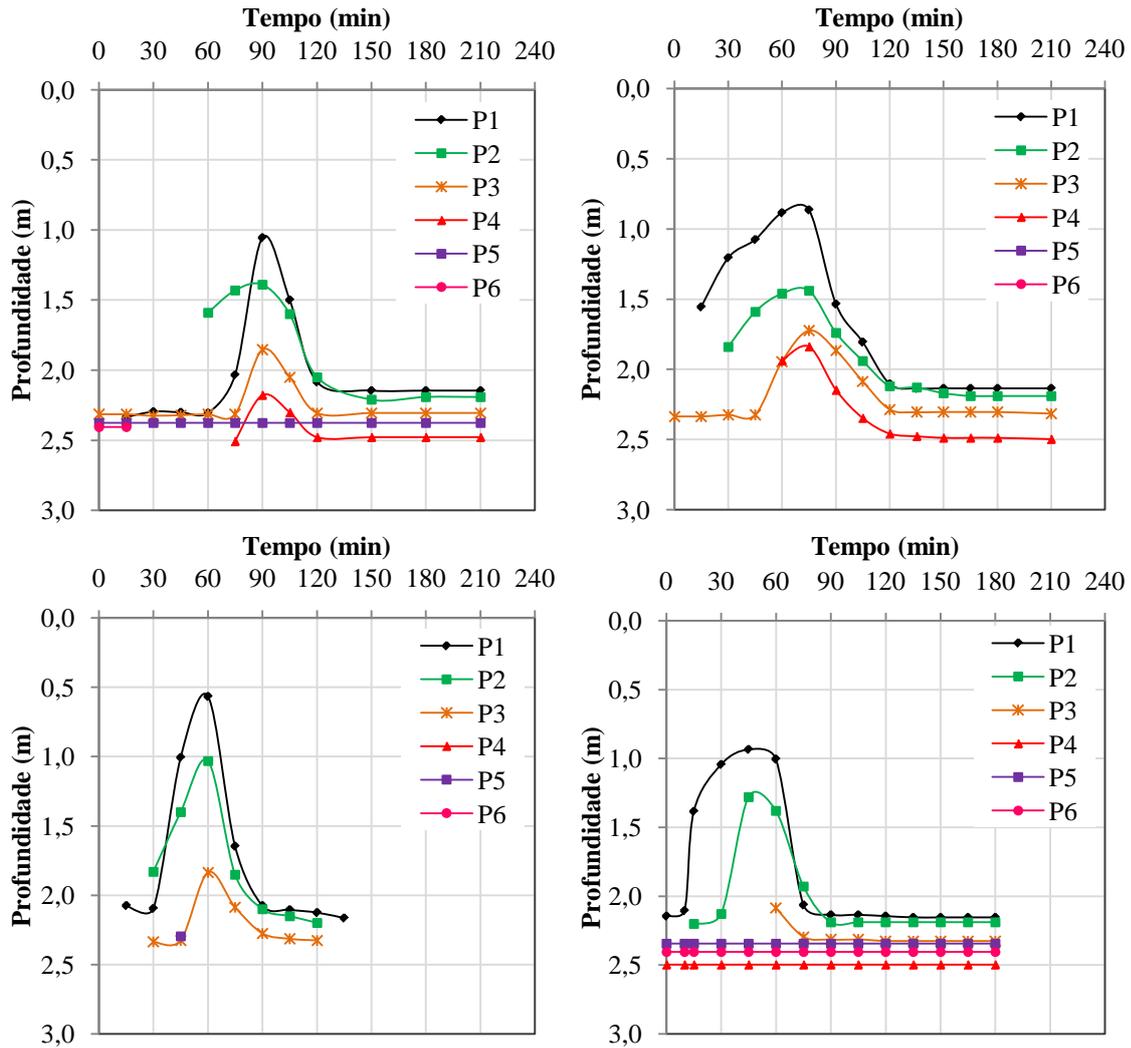
D9 – Gráfico Piezômetro: Profundidade x Tempo, Trincheira 2: a) 1ª etapa, b) 2ª etapa e c) 3ª etapa de ensaios de enchimento.



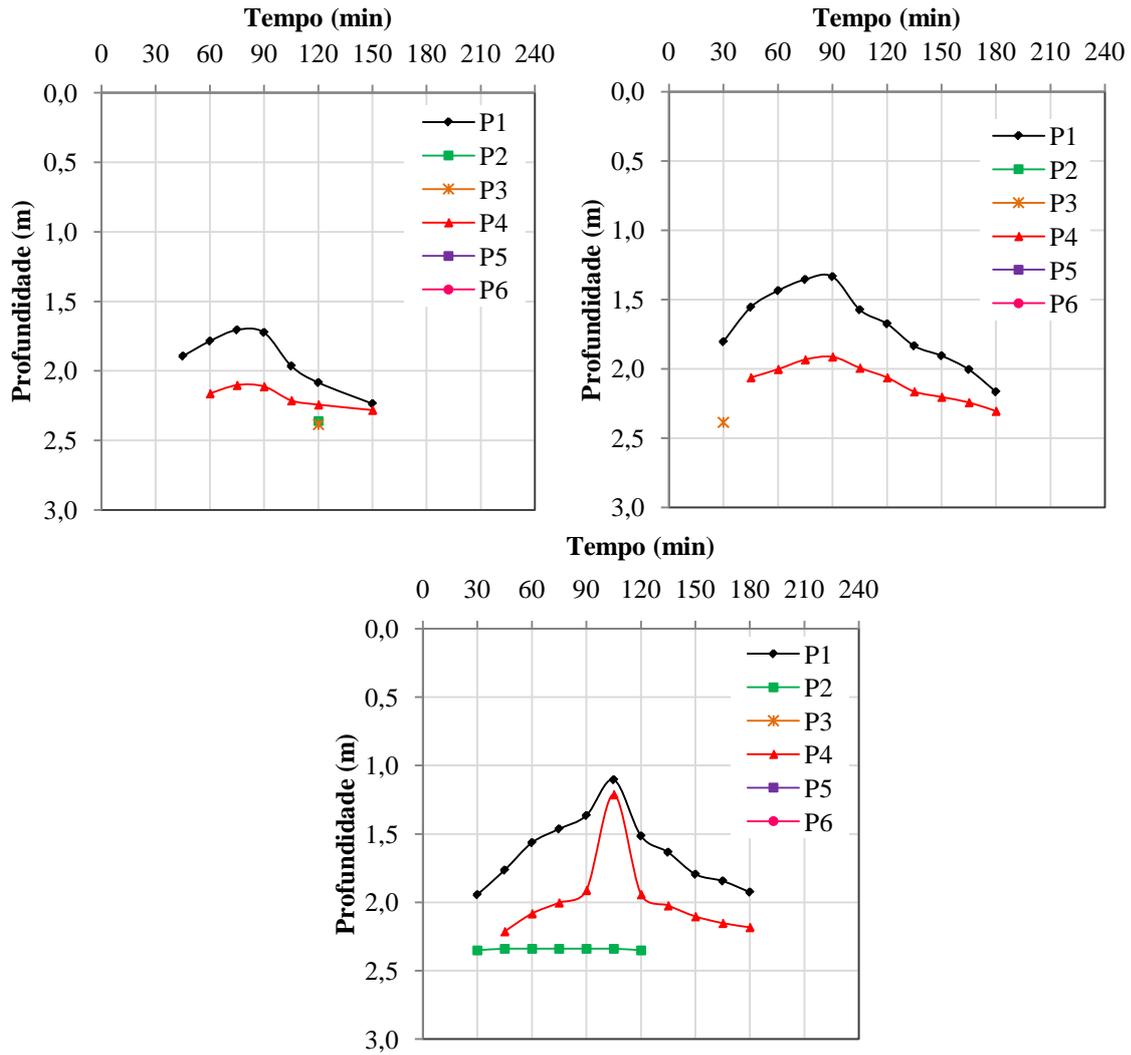
D10 – Gráfico Piezômetro: Profundidade x Tempo, Trincheira 3: a) 1ª etapa, b) 2ª etapa, c) 3ª etapa e d) 4ª etapa de ensaios de enchimento.



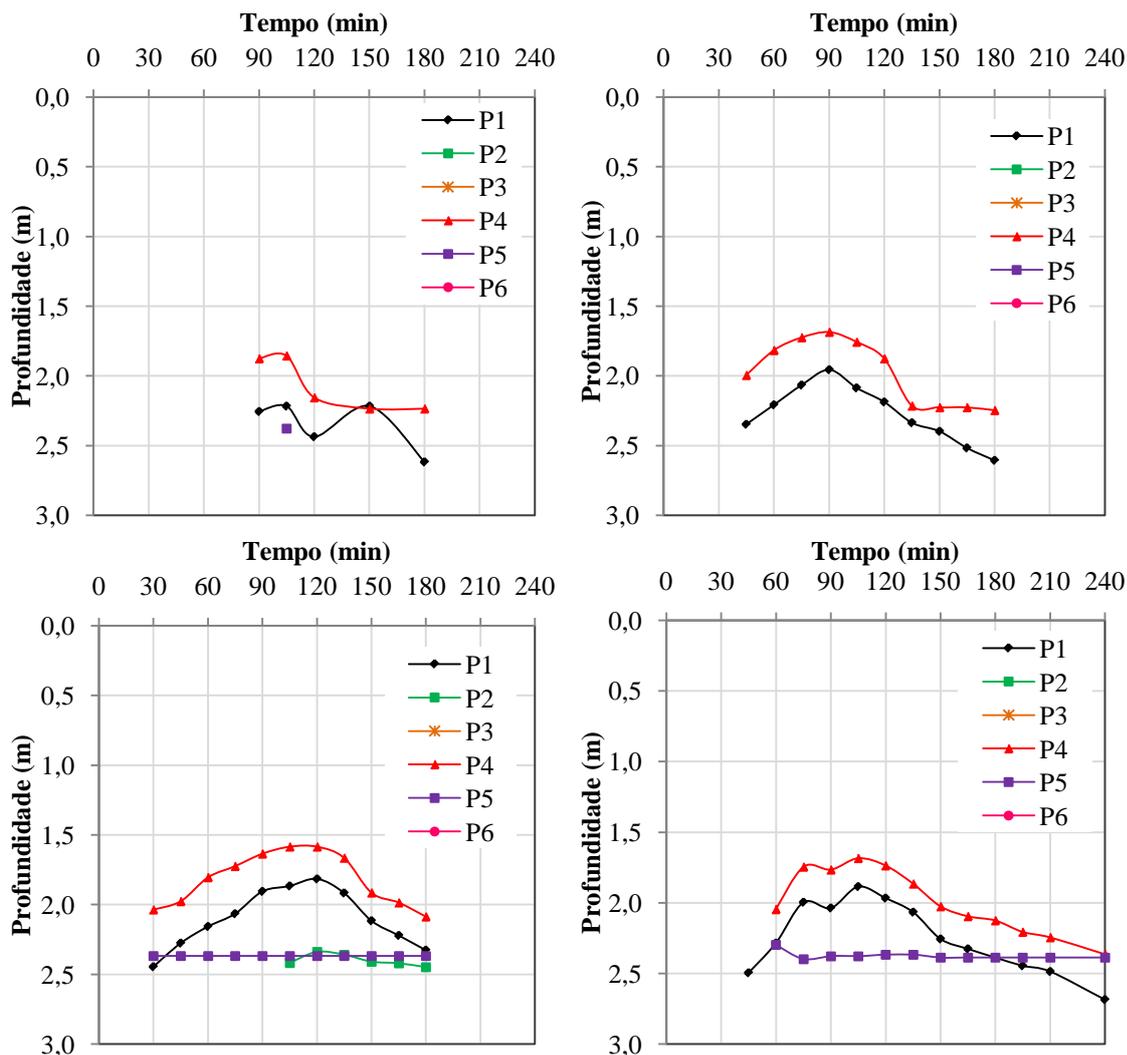
D11 – Gráficos Piezômetros: Profundidade x Tempo, Trincheira 4: a) 1ª etapa, b) 2ª etapa e c) 3ª etapa de ensaio de enchimento.



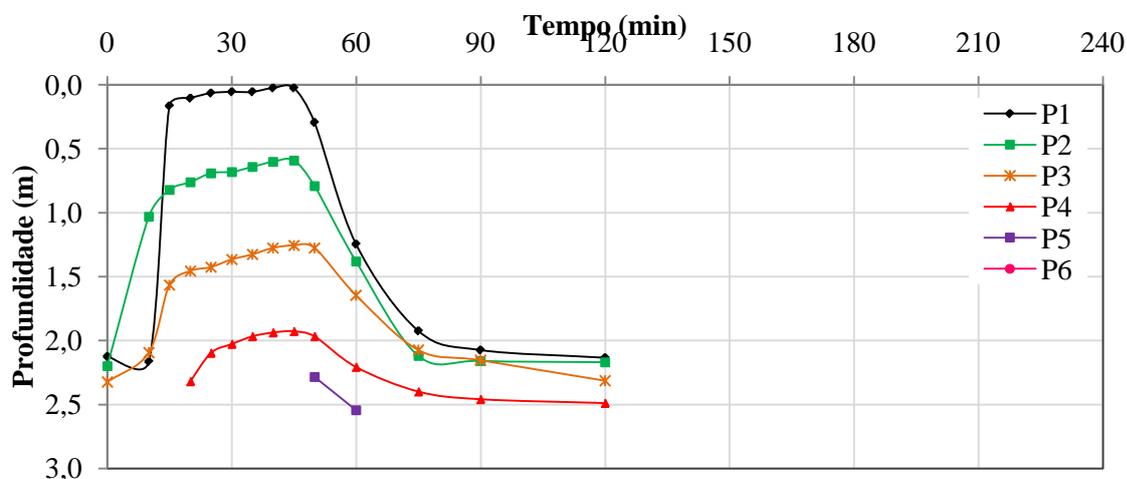
D12 – Gráficos Piezômetros: Profundidade x Tempo, Trincheira 5: a) 1ª etapa, b) 2ª etapa, c) 3ª etapa e d) 4ª etapa de ensaio de enchimento.



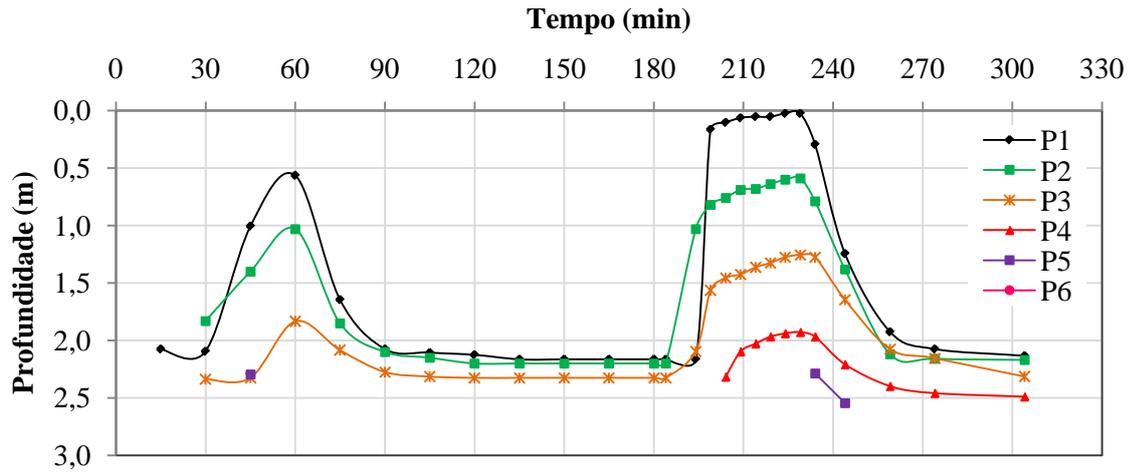
D13 – Gráficos Piezômetros: Profundidade x Tempo, Trincheira 6: a) 1ª etapa, b) 2ª etapa e c) 3ª etapa de ensaio de enchimento.



D14 – Gráficos Piezômetros: Profundidade x Tempo, Trinchera 7: a) 1ª etapa, b) 2ª etapa, c) 3ª etapa e d) 4ª etapa de ensaio de enchimento.



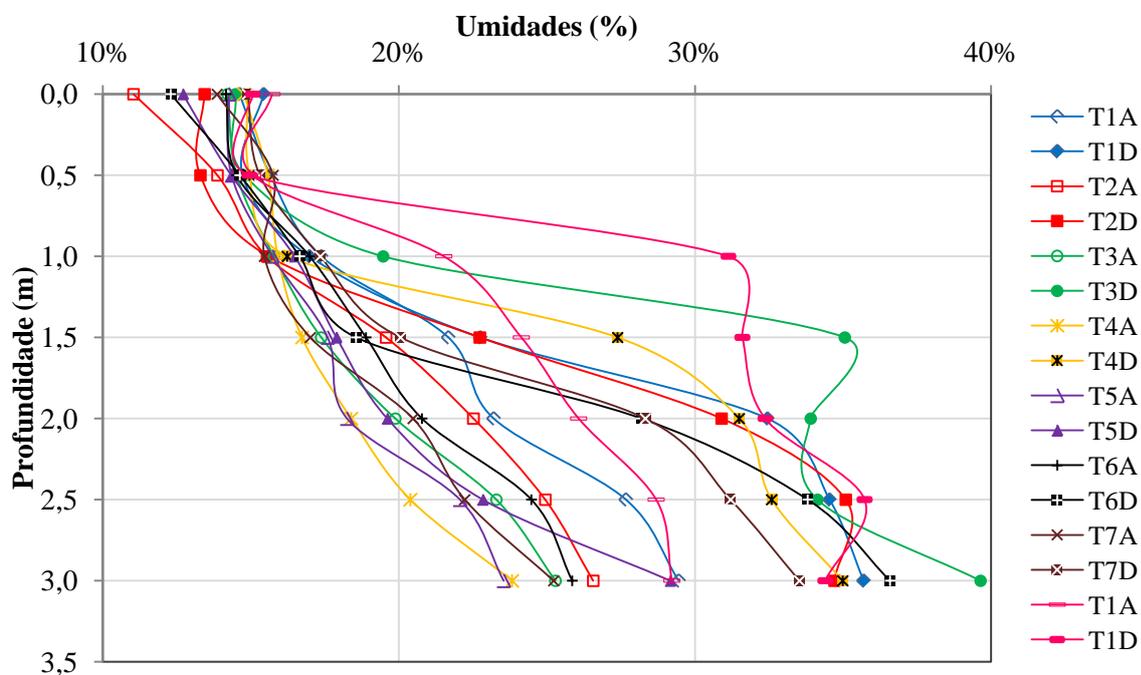
D15 – Gráfico Piezômetro: Profundidade x Tempo, ensaio de enchimento Trinchera 5 – contínuo 2ª etapa.



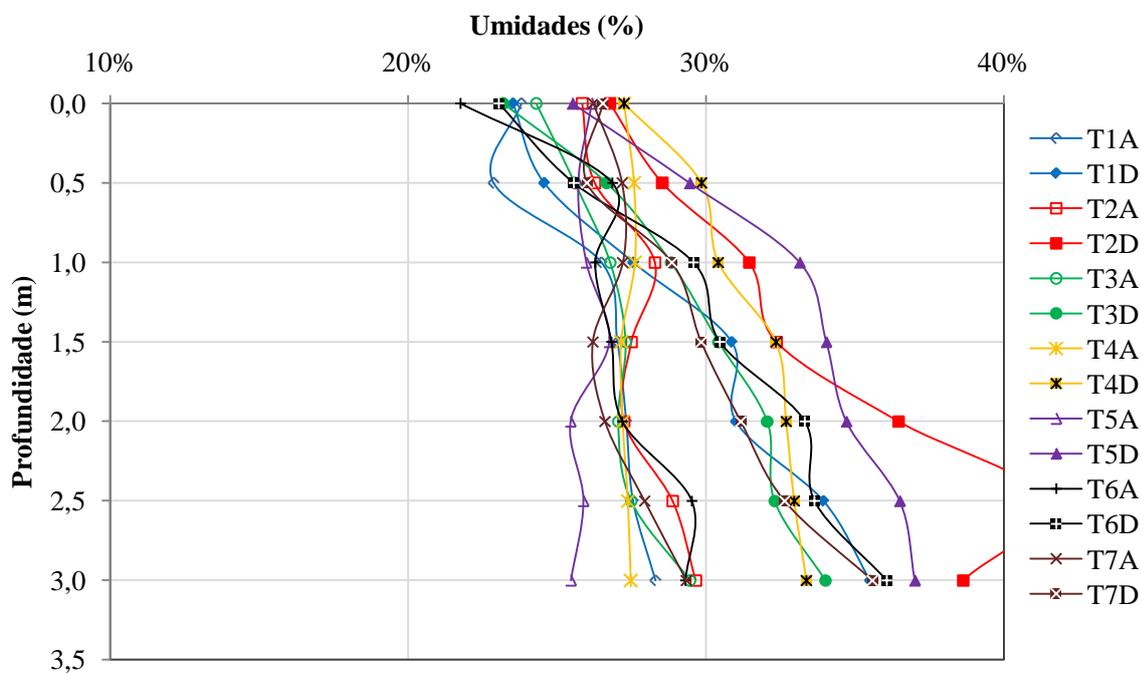
D16 – Gráfico Piezômetro: Profundidade x Tempo, ensaio de enchimento Trincheira 5 – contínuo completo.

## ANEXO “E”

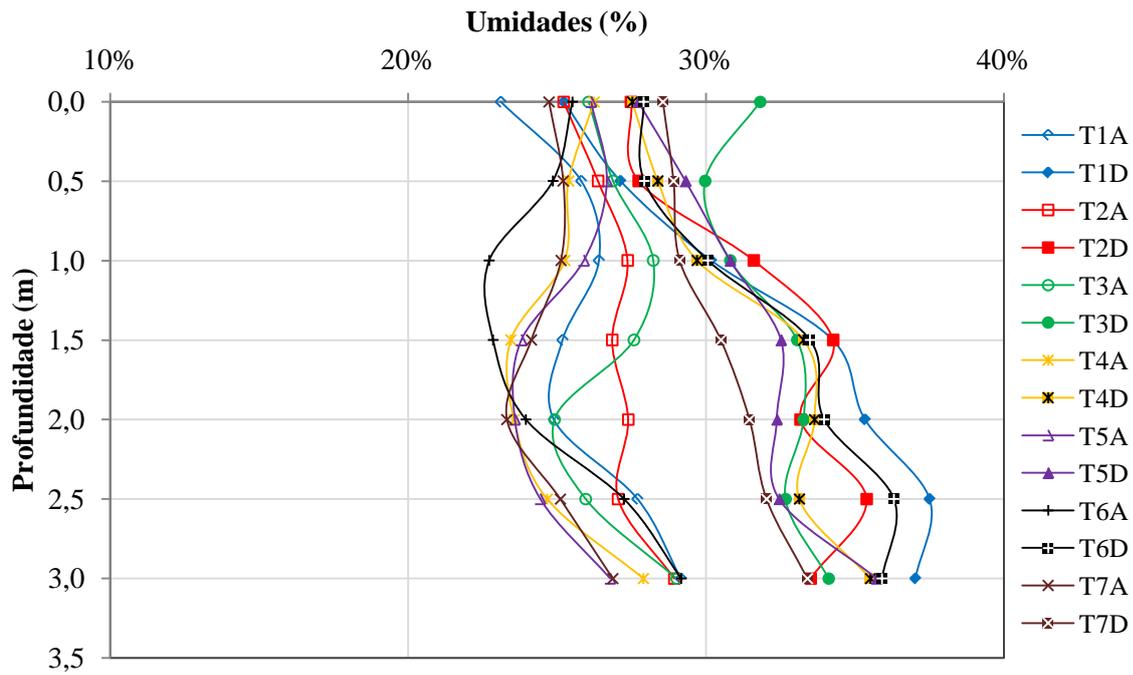
### Perfil de Umidade



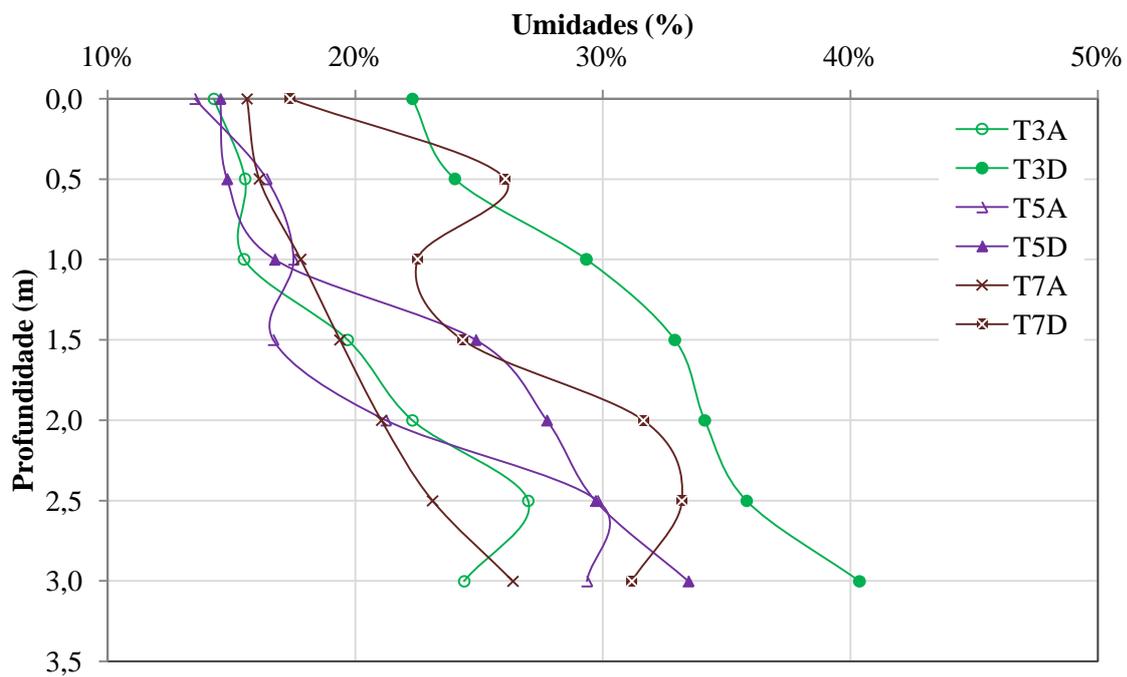
E1 – Umidade antes e depois do ensaio, trincheiras 1 a 7 – 1º Ensaio.



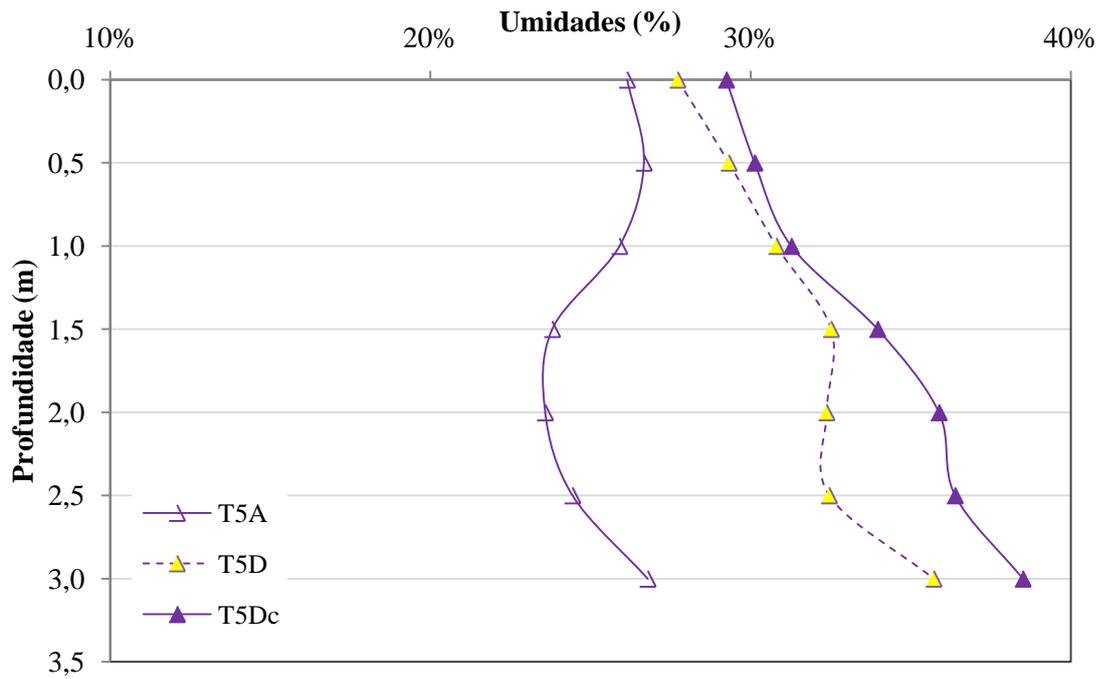
E2 – Umidade antes e depois do ensaio, trincheiras 1 a 7 – 2º Ensaio.



E3 – Umidade antes e depois do ensaio, trincheiras 1 a 7 – 3º Ensaio.



E4 – Umidade antes e depois do ensaio, trincheiras 3, 5 e 7 – 4º Ensaio.



E5 – Umidade antes, durante e depois do ensaio contínuo, trincheiras 5.