

PROC N.º 019 204 19 12010
RUB. 103
PRPG 081 103 12013

ERRATA

Eu, Patrícia Diniz Martins, ex-aluna do curso de Mestrado em Engenharia Civil, informo que deve-se considerar a seguinte errata em folha v:

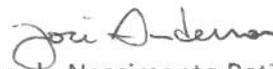
Onde se lê: Simulação

Leia-se: Estudo

Sem mais.



Patrícia Diniz Martins



Prof. Dr. José Anderson do Nascimento Batista

Orientador



Prof. Dr. José Roberto Guimarães
Matrícula 245615
Coordenador de Pós-Graduação
FEC/UNICAMP



PATRÍCIA DINIZ MARTINS

**ESTUDO DE INFILTRAÇÃO E RECARGA DIRETA EM
UM LISÍMETRO DE LABORATÓRIO**

CAMPINAS, SP
2013



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

PATRÍCIA DINIZ MARTINS

**ESTUDO DE INFILTRAÇÃO E RECARGA DIRETA EM
UM LISÍMETRO DE LABORATÓRIO**

Orientador: Prof. Dr. José Anderson Batista do Nascimento

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil na área de concentração Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais.

**ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA
DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA PATRÍCIA DINIZ
MARTINS E ORIENTADA PELO PROF. DR. JOSÉ ANDERSON
BATISTA DO NASCIMENTO.**

ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS, SP
2013

FICHA CATALOGRÁFICA

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

M366e Martins, Patrícia Diniz
Estudo de infiltração e recarga direta em um lisímetro de laboratório / Patrícia Diniz Martins. --Campinas, SP: [s.n.], 2013.

Orientador: José Anderson Batista do Nascimento .
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Lisímetro. 2. Infiltração . 3. escoamento. 4. Monolito. I. Nascimento, José Anderson Batista do. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Study and infiltration recharge direct in laboratory lysimeter

Palavras-chave em Inglês: Lysimeters, Infiltration, Runoff, Monolith

Área de concentração: Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais

Titulação: Mestra em Engenharia Civil

Banca examinadora: Miriam Gonçalves Miguel, Sueli Yoshinaga Pereira

Data da defesa: 30-01-2013

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

SIMULAÇÃO DE INFILTRAÇÃO E RECARGA DIRETA EM UM LISÍMETRO DE LABORATÓRIO

PATRÍCIA DINIZ MARTINS

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

A handwritten signature in black ink, appearing to read "José Anderson do Nascimento Batista".

Prof. Dr. José Anderson do Nascimento Batista
Presidente e Orientador
FEC/Unicamp

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Miriam Gonçalves Miguel".

Profa. Dra. Miriam Gonçalves Miguel
FEC/Unicamp

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Sueli Yoshinaga Pereira".

Profa. Dra. Sueli Yoshinaga Pereira
IG/Unicamp

Campinas, 30 de janeiro de 2013

Ao meu filho Felipe Martins Fávero
dedico.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos:

a Deus pela vida e luz no meu caminho;

aos meus pais que amo tanto e estiveram ao meu lado nesta trajetória;

a minha irmã Francielle e filho Felipe, pelo carinho e cooperação;

ao coordenador e orientador do projeto Prof. Dr. José Anderson Batista do Nascimento pela dedicação e ensinamentos;

à Faculdade de Engenharia Civil, ao Departamento de Recursos Hídricos pelas instalações e recursos colocados à disposição, tornando exequível a fase analítica deste estudo;

aos membros da banca pela ética e profissionalismo;

aos funcionários do laboratório de Hidrologia Marcelo Balbino pela amizade, apoio e auxílio na coleta de dados;

aos amigos que acompanharam o meu crescimento desde a minha chegada;

enfim,

a todos que de alguma forma tornaram possível o desenvolvimento do projeto.

“A nossa ciência pode parecer primitiva e infantil comparada com a realidade, mas é a coisa mais preciosa que temos.”

Albert Einstein

RESUMO

Estudos sobre a infiltração de água no solo são importantes para a determinação do escoamento superficial direto e da recarga direta de aquíferos, essenciais para a quantificação dos recursos hídricos. O presente trabalho tem com objetivo estudar os processos de produção de escoamento superficial e recarga direta de aquíferos por meio de um lisímetro de gravidade com amostra indeformada em escala de campo ensaiado em laboratório. O lisímetro foi construído a partir da retirada de uma amostra de solo com 0,6 m de diâmetro e 1,7 m de profundidade. Os procedimentos de escavação, transporte e instalação do lisímetro foram realizados dentro de um período de 6,25 horas, tempo inferior à instrumentação de uma bacia. Foi observado um amalgamento da amostra após a cravação de 0,20 m; correspondente a 10,5% da altura total de cravação, que é compatível com índices obtidos de amostradores. Foram realizadas simulações de eventos chuvosos no topo da amostra, correspondentes a uma chuva intensa de tempo de retorno de 10 anos com intervalo de sete dias e as tensões mátricas antecedentes e decorrentes dos ensaios ao longo da profundidade foram monitoradas. Os eventos chuvosos ensaiados não produziram escoamento superficial direto, porém a capacidade de infiltração foi caracterizada. A partir da obtenção de curvas de retenção para a amostra, a recarga direta foi observada com menores valores em períodos de menor umidade que correspondem às maiores tensão mátricas encontradas (15 a 58 kPa). Os maiores valores ocorreram após os eventos de precipitação. As tensões mátricas antecedentes caíram até a faixa de 0,2 a 4 kPa durante os períodos de ensaios. O uso de lisímetro em laboratório não substitui a prática de instrumentação de bacias nem o uso de lisímetros em campo. Considera-se que o uso de lisímetro em laboratório acarreta em condições ainda artificiais principalmente de precipitação e escoamento superficial direto. Ainda assim, a experimentação de uma amostra de solo indeformado em escala vertical de campo em laboratório, de acordo com os resultados obtidos neste trabalho, representa de forma aproximada o comportamento real da infiltração, percolação e produção de escoamento superficial direto encontrados em um perfil litológico raso.

Palavras chave: lisímetros, infiltração, escoamento superficial, monólito de solo

ABSTRACT

Studies on water infiltration in soil are important for determining the runoff and direct recharge of aquifers, which are essential for the quantification of water resources. The goal of this work is to study the production processes of runoff and direct recharge of aquifers through a gravity lysimeter with undisturbed sample scale field tested in the laboratory. The lysimeter was constructed from the withdrawal of a soil sample with 0.6 m diameter and 1.7 m deep. The procedures for excavation, transportation and installation of the lysimeter were performed within a period of 6.25 hours, less time instrumentation of a watershed. We observed an amalgamation of the sample after the crimping of 0.20 m; corresponding to 10.5% of the total height of crimping, which is compatible with indices obtained from samplers. We simulated rainfall events on top of the sample, corresponding to an intense rain of turnaround time of 10 years with an interval of seven days and the tensions arising matrices antecedents and tests along the depth were monitored. The rainfall events tested did not produce runoff, but the infiltration capacity was characterized. Upon obtaining retention curves for the sample, direct recharge was observed with lower values during periods of reduced moisture that correspond to higher voltage matrices found (15-58 kPa). The highest values occurred after rainfall events. The voltages fell to background matrices range of 0.2 to 4 kPa during periods of testing. The use of laboratory lysimeter does not replace the practice of instrumentation basins or the use of lysimeters in the field. It is considered that the use of lysimeter laboratory conditions still entails primarily artificial precipitation and runoff. Nevertheless, the experimentation of a sample of undisturbed soil at field vertical scale in the laboratory, according to the results obtained in this study represents an approximation of the actual behavior infiltration and seepage runoff production of a profile found in lithology shallow.

Keywords: lysimeters, infiltration, superficial runoff, soil monolith

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-CRAS considerando as faces de secamento e molhamento.....	9
Figura 2-Esquema de um Psicrometro	11
Figura 3-Foto das amostras alinhadas e representação do papel filtro sobre as amostras.....	12
Figura 4- Esquema de um Tensiômetro	13
Figura 5-Placa de Richards de alta pressão (esquerda) e baixa pressão (direita).....	14
Figura 6-Efeito da saturação na condutividade hidráulica (a) fluxo de água em solo saturado (b) Fluxo de água em solo insaturado	17
Figura 7-Lisímetro pan com a retirada de água por tensão	20
Figura 8-Lisímetro de pesagem.....	22
Figura 9- Lisímetro de tensão mátrica.....	23
Figura 10-Lisímetro de gravidade.....	24
Figura 11 - Localização das bacias hidrográficas do córrego Bom Jardim: (a) localização entre as bacias do estado de SP e (b) localização das bacias hidrográficas do córrego Bom Jardim e (c) local da área de estudo	28
Figura 12- Esquema do Cilindro Amostrador e suporte de aço carbono	30
Figura 13-Posicionamento do Cilindro do Amostrador para Cravação no Solo	32
Figura 14-Escavação manual em torno do Amostrador	33
Figura 15-Rebaixamento do Conteúdo do Lisímetro em Relação ao Nível do Terreno	34
Figura 16-Escavação manual em torno do Amostrador	35
Figura 17-Projeto do Lisímetro	39
Figura 18-Lisímetro instalado em laboratório.....	40
Figura 19-Composição granulométrica no perfil do solo.....	43
Figura 20-Curva de granulometria conjunta	44
Figura 21 - C.R.A.S. monitorada nos Perfis de solo 1 e 2 por secamento e 3 e 4 por molhamento na profundidade de 0,5 m.....	45
Figura 22 - C.R.A.S. monitorada nos Perfis de solo 1 e 2 por secamento e 3 e 4 por molhamento na profundidade de 1,0 m.....	46
Figura 23 - C.R.A.S. monitorada nos Perfis de solo 1 e 2 por secamento e 3 e 4 por molhamento na profundidade de 1,5 m.....	46
Figura 24 - C.R.A.S. monitorada nos Perfis de solo 1 e 2 por secamento e 3 e 4 por molhamento na profundidade de 2,0 m.....	47

Figura 25-C.R.A.S. monitorada e calculada pelas equações desenvolvidas por van Genuchten nos Perfis de solo 1 e 2 por secamento na profundidade de 0,5 m	49
Figura 26-C.R.A.S. monitorada e calculada pelas equações desenvolvidas por van Genuchten nos Perfis de solo 1 e 2 por secamento na profundidade de 1,0 m	49
Figura 27- C.R.A.S. monitorada e calculada pelas equações desenvolvidas por van Genuchten nos Perfis de solo 1 e 2 por secamento na profundidade de 1,5 m.....	50
Figura 28-C.R.A.S. monitorada e calculada pelas equações desenvolvidas por van Genuchten nos Perfis de solo 1 e 2 por secamento na profundidade de 2,0 m	50
Figura 29-Total de Mercúrio introduzido em relação ao diâmetro dos poros no perfil 1 na profundidade de 0,25m.....	51
Figura 30-Total de Mercúrio introduzido em relação ao diâmetro dos poros no perfil 1 na profundidade de 0,75m.....	52
Figura 31-Total de Mercúrio introduzido em relação ao diâmetro dos poros no perfil 1 na profundidade de 1,25m.....	52
Figura 32-Total de Mercúrio introduzido em relação ao diâmetro dos poros no perfil 1 na profundidade de 1,75m.....	53
Figura 33-Distribuição de Mercúrio introduzido em relação ao diâmetro dos poros no perfil 1 na profundidade de 0,25m.....	53
Figura 34-Distribuição de Mercúrio introduzido em relação ao diâmetro dos poros no perfil 1 na profundidade de 0,75m.....	54
Figura 35 - Distribuição de Mercúrio introduzido em relação ao diâmetro dos poros no Perfil 1 na profundidade de 1,25m.....	54
Figura 36 - Distribuição do Mercúrio introduzido em relação ao diâmetro dos poros no perfil 1 na profundidade 1,75 m	55
Figura 37-Porosidade no perfil de solo	56
Figura 38-Densidade dos sólidos ao longo do perfil do solo	56
Figura 39-Perfis de densidade aparente seca do solo	57
Figura 40-Perfil inicial de tensões observadas no lisímetro dia 15/05/2012.....	58
Figura 41-Perfil inicial de tensões observadas no lisímetro dia 29-05-2012	59
Figura 42-Evolução do Potencial de água no solo ao longo do perfil do solo do lisímetro durante o Ensaio 1 realizado dia 29-05-2012.....	60
Figura 43-Perfil inicial de tensões observadas no lisímetro dia 05-06-2012	60
Figura 44- Evolução do Potencial de água no solo ao longo do perfil do solo do lisímetro durante o Ensaio 2 realizado dia 05-06-2012.....	61

Figura 45-Perfil inicial do Potencial de água no solo observadas no lisímetro dia 12-06-2012	61
Figura 46 - Evolução do Potencial de água no solo ao longo do perfil do solo do lisímetro durante o Ensaio 3 realizado dia 12-06-2012.....	62
Figura 47-Perfil inicial de tensões observadas no lisímetro dia 19-06-2012	62
Figura 48 - Evolução do Potencial de água no solo ao longo do perfil do solo do lisímetro durante o Ensaio 4 realizado dia 19-06-2012.....	63
Figura 49 - Evolução das Tensões ao longo do perfil do solo do lisímetro durante o Ensaio 4 realizado dia 19-06-2012 por 70 dias.	63
Figura 50-Evolução do Volume Acumulado do Percolado.....	65
Figura 51-Taxa de percolação	66
Figura 52-Varição de Armazenamento de Água.....	68
Figura 53-Resíduo do Balanço Hídrico.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Parâmetros utilizados na calibração das equações de van Genuchten para a Curva de Secagem.	48
Tabela 2 - Variação de Umidade do Lisímetro	67
Tabela 3 - Balanço hídrico do Lisímetro.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA - Agência Nacional de Águas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

ASTM – American Society for Testing and Materials

AT - Bacia Alto Tietê

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

CRAS - Curva de Retenção de Água no Solo

DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica

DS - Deflúvio Superficial

ETA DAEV – Estação de Tratamento de Água Departamento de Águas e Esgoto de Valinhos

ETE SANEBAVI – Estação de Tratamento de Esgoto Saneamento Básico Vinhedo

FAO – Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura

FEHIDRO - Fundo Estadual de Recursos Hídricos

IAP - Índice de Qualidade de Água Bruta para fins de Abastecimento Público

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IQA - Índice de Qualidade de Água

LQP - Limite de Quantificação Praticável

NE - Nordeste

PCJ - Piracicaba/Capivari/Jundiaí

PBH - Plano de Bacia Hidrográfica

SPT - Standard Penetration Test

UGRHI - Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos

USP - Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	Objetivos gerais.....	3
2.2	Objetivos Específicos.....	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1	Índices Físicos do solo	4
3.2	Retenção de Água no solo.....	7
3.3	Dispositivos de medição do Potencial Mátrico	10
3.4	Balanço Hídrico.....	15
3.5	Lisímetros.....	19
4	MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1	Área de Estudo	27
4.2	Construção do Amostrador.....	29
4.3	Adaptação para a Extração da amostra.....	31
4.4	Caracterização do solo	35
4.5	Instrumentação do Lisímetro.....	38
4.6	Simulação da Precipitação	40
4.7	Retenção de água no solo.....	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1	Caracterização do Solo.....	43
5.2	Simulação de precipitação e monitoramento manométrico.....	58
5.3	Balanço Hídrico do Lisímetro	64
5.4	Efeito do amolgamento no Índice de vazios e na porosidade	69
6	CONCLUSÕES.....	72
	REFERÊNCIAS.....	74

1 INTRODUÇÃO

Diversos desastres são causados devido às inundações, várias vidas são perdidas, além das perdas econômicas. Esse problema vem se agravando com a urbanização das cidades devido, principalmente, à impermeabilização do solo.

Várias técnicas de macro e microdrenagem podem ser utilizadas para a minimização da vazão de pico. O custo de técnicas estruturais como a construção de canais e construção de reservatórios é alto e a sua eficiência nem sempre é satisfatória. A utilização de áreas permeáveis que permitam a infiltração da água e redução do escoamento vem sendo adotada com bons resultados; porém, geralmente, são implantadas áreas de infiltração sem o estudo do solo e sem o conhecimento da taxa de infiltração, conseqüentemente, em muitos casos, o percentual de área permeável não atende à necessidade de redução do pico de vazão, reduzindo a eficiência da técnica.

Vários fatores influenciam na maior ou menor vazão específica como: declividade da bacia, tipo de solo, manejo adotado, entre outros. Assim, o conhecimento das características locais do solo somadas aos impactos antrópicos pode definir o comportamento de bacias hidrográficas. A análise dos componentes da geração de escoamento superficial direto permite verificar a sua influência e pode-se, então, propor medidas efetivas para sua redução.

A infiltração de água no solo tem grande importância na relação da precipitação com a vazão gerada em bacias hidrográficas. Estudos sobre a retenção de água no solo são fundamentais para a previsão do comportamento hidráulico de determinado tipo de solo, de acordo com suas características hidráulicas. Neste trabalho, estudou-se a infiltração, a retenção e a percolação de água no solo em um lisímetro de gravidade *ex situ*. O volume percolado no lisímetro também foi monitorado e relacionado com o conteúdo de armazenamento de água no solo e a infiltração.

Pequenas amostras de solo não representam a macroporosidade do solo e às diferentes camadas. Por esse motivo, neste trabalho foi utilizado um lisímetro de gravidade *ex situ* construído a partir de uma grande amostra de solo, com 0,6 m de diâmetro e 1,7 m de profundidade. Vertedores instalados no topo do lisímetro são utilizados para coletar o escoamento superficial direto da amostra. Todos esses cuidados são tomados para que a amostra represente o

perfil do solo da bacia hidrográfica do Ribeirão Bom Jardim, localizada nos municípios de Valinhos e Vinhedo, região metropolitana de Campinas (SP).

Para bacias urbanas, principalmente, onde os efeitos das enchentes tornam-se catastróficos, o alto custo somado ao desconforto causado com obras de medidas estruturais geralmente em áreas com elevado desenvolvimento urbano, torna seu emprego desfavorável. Por outro lado, medidas não estruturais como poços e áreas para infiltrações tornam-se vantajosas. Assim, o conhecimento do impacto causado e a redução do escoamento superficial reduzido com essas medidas devem ser estudados. Para tanto, o estudo da capacidade de infiltração de água no solo se torna importante. Quanto maior a taxa de infiltração maior é a recarga.

Com a construção de um lisímetro monolítico e seu ensaio com aplicações de chuvas sintéticas em laboratório deseja-se caracterizar a produção do escoamento direto e a recarga direta em função de um perfil de solo. A partir de um determinado número de eventos estudados espera-se contribuir para a significância das estimativas dos parâmetros. Os resultados poderão ser utilizados na previsão de escoamento total para determinar a necessidade de técnicas que possibilitem maior infiltração de água no solo, redução dos picos de vazões e, conseqüentemente, redução dos prejuízos causados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

O presente trabalho tem com objetivos gerais estudar os processos de produção de escoamento superficial e recarga direta de aquíferos por meio de um lisímetro de gravidade com monólito de solo em escala de campo.

2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos para o desenvolvimento deste trabalho, têm-se:

- a) Coletar uma grande amostra de solo (monólito) com o menor distúrbio possível;
- b) Estudar a infiltração de água no solo durante eventos chuvosos sintéticos em lisímetro.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Índices Físicos do solo

Para o estudo de infiltração de água no solo, é de extrema importância o conhecimento de sua textura, definida com o percentual de pedregulho, areia, silte e argila dos solos. Os solos podem ser classificados em finos e grossos de acordo com o tamanho das partículas que o compõe e não apresentam uma alteração significativa ao longo do tempo. A textura do solo é muito importante, pois influi diretamente na taxa de infiltração de água e sua retenção no solo.

A porosidade do solo está diretamente ligada à textura e geometria dos poros do mesmo. A geometria dos poros do solo é muito complexa e tem influência direta na percolação de água no solo. O material de preenchimento dos poros de cada tipo de solo permite caracterizá-lo: quando os poros do solo estão preenchidos com material na fase líquida, ele está saturado; quando também há materiais gasosos nos espaços porosos, o solo é dito não saturado. A área que compreende os solos não saturados até o nível de água no solo é denominada zona vadosa, objeto de estudo de vários pesquisadores (MIYAZAKI, 2006).

Alguns conceitos são essenciais para a caracterização apropriada do solo. Características como densidade das partículas, densidade do solo, umidade, porosidade, grau de saturação e porosidade livre de água permitem caracterizar uma amostra de solo.

3.1.1 Densidade dos sólidos

A densidade das partículas [ML^{-3}] é dada por:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (1)$$

Em que,

ρ_s = densidade dos sólidos [ML^{-3}]

m_p = massa dos sólidos [M]

V_s = volume dos sólidos [L^{-3}]

O valor da densidade das partículas do solo ou densidade real varia de acordo com a composição química e mineralógica do solo (MIYAZAKI, 2006). Seu principal uso refere-se à estimativa da textura, principalmente.

3.1.2 Densidade natural do solo

A densidade aparente seca do solo $[ML^{-3}]$ é determinada por:

$$\rho_n = \frac{m}{V} \quad (2)$$

em que,

ρ_n = densidade natural do solo $[ML^{-3}]$

m = massa de solo com umidade encontrada em campo $[M]$

V = volume do solo $[L^{-3}]$

3.1.3 Densidade aparente seca do solo

A densidade aparente seca do solo $[ML^{-3}]$ é determinada por:

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (3)$$

em que,

ρ_d = densidade aparente do solo $[ML^{-3}]$

m_s = massa de solo seco $[M]$

V = volume do solo $[L^{-3}]$

3.1.4 Umidade

A umidade volumétrica (θ) representa a relação entre volume de água e volume total do solo. Pode ser calculada, sabendo-se a umidade gravimétrica e densidade natural do solo, conforme a seguir:

$$\theta = \left[\frac{V_w}{V} \right] = \left[\frac{m_w}{V} \right] = \left[\frac{m - m_s}{V} \right] = \left[\frac{m_w \cdot \rho_n}{m_s} \right] = u \cdot \rho_n \quad (4)$$

em que,

ρ_n = densidade natural do solo [ML^{-3}]

m_s = massa dos sólidos [M]

m_w = massa da fase líquida [M]

m = massa de solo [M]

V = volume do solo [L^3]

u = umidade gravimétrica [MM^{-1}]

V_w = volume de água [L^3]

A umidade θ é adimensional e com frequência é apresentada em percentagem. Normalmente toma-se V_w por m_w , considerando a densidade da solução do solo como $1 ML^{-3}$.

3.1.5 Porosidade

A quantidade relativa de poros do solo é definida por porosidade α (L^3L^{-3}) e é dada por:

$$\alpha = \frac{V_t - V_s}{V_t} = \frac{V_v}{V} = \frac{V_w + V_a}{V_w + V_a + V_s} \quad (5)$$

em que,

α = Porosidade do solo [L^3L^{-3}]

V_s = volume dos sólidos [L^3]

V_w = volume da fase líquida [L^3]

V = volume total [L^3]

V_a = Volume de ar [L^3]

V_v = Volume de poros [L^3]

A porosidade do solo é inversamente proporcional a sua densidade aparente e de grande importância para o movimento de ar, água e solutos no solo. A textura e estrutura dos solos explicam em grande parte o tipo, tamanho, quantidade e continuidade dos poros.

3.1.6 Grau de saturação

O grau de saturação pode ser definido como a quantidade de vazios do solo preenchida por água, varia de 0 a 1, e é dado por:

$$S = \frac{\theta}{\alpha} \cdot 100 = \frac{V_w}{V} \cdot \frac{V_v}{V_v} \quad (6)$$

em que,

S = grau de saturação [%]

θ = umidade volumétrica [L^3L^{-3}]

α = Porosidade do solo [L^3L^{-3}]

3.2 Retenção de Água no solo

O potencial total de água no solo é definido pelo estado de energia do sistema no ponto considerado e representa a diferença da energia no sistema entre o estado da água no solo e um estado padrão (REICHARDT e TIMM, 2004).

Conforme estudos de Reichardt e Timm (2004), o conhecimento do estado de energia da água no solo em cada ponto do sistema pode permitir o cálculo das forças que atuam sobre a água e determinar quanto afastada se acha do ponto de equilíbrio.

De acordo com o tamanho do poro, a água pode ser hidrocópica (absorvida) e praticamente imóvel, capilar quando sofre ação da tensão superficial. Neste caso, ela se move lentamente ou gravitacional (livre) em poros maiores, que permitem movimento mais rápido. É considerada que toda água do solo é afetada pelo campo gravitacional, tanto a água capilar, quanto a água hidrocópica, justificando que as leis da capilaridade não explicam, por completo, o fenômeno de retenção de água no solo. A água não difere na forma e sim, no estado de energia.

O potencial total da água é a soma de cinco componentes: térmica, de pressão, gravitacional, osmótica e matricial. Torna-se necessário, portanto, não só o estudo do trabalho das forças matriciais e sim de todas as forças que compõem o sistema. O potencial térmico pode ser considerado desprezível devido às pequenas variações no sistema (REICHARDT e TIMM, 2004).

Então, têm-se que o potencial total (Ψ [FL^{-2}]) é expresso por:

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_g + \Psi_{os} + \Psi_m \quad [FL^{-2}] \quad (7)$$

em que:

Ψ_p = componente de pressão, presente sempre que a pressão que atua sobre a água do solo é diferente e maior que a pressão que atua sobre a atmosfera $[\text{FL}^{-2}]$;

Ψ_g = componente gravitacional, ocorre em decorrência da presença do campo gravitacional terrestre a uma profundidade;

Ψ_{os} = componente osmótica, é utilizada pelo fato de a água no solo conter solutos $[\text{FL}^{-2}]$;

Ψ_m = componente matricial é a soma de todos os outros trabalhos que envolvem a interação entre a matriz sólida do solo e a água, como trabalho capilar, trabalho contra forças de adsorção $[\text{FL}^{-2}]$.

A presença de solutos na água implica trabalho químico, que não deixa de contribuir para o sistema água-solo. Todas as interações entre a água e a matriz sólida do solo, que envolvem forças capilares, de adsorção, elétricas e outras são denominadas forças matriciais que levam a um trabalho matricial. O trabalho matricial ou simplesmente tensão mátrica envolve as forças conservativas como capilares (σdA , em que, σ = tensão superficial e A = área), de adsorção e elétricas (ϵde , em que, ϵ = potencial elétrico e e = carga elétrica). Sua intensidade está relacionada à umidade do solo, o que implica em uma relação direta com a curva de retenção de água no solo (REICHARDT e TIMM, 2004).

Esses fenômenos levam a água a pressões menores que P_o , pressão da água padrão (pressão atmosférica). São, portanto, pressões negativas, denominadas subpressões ou tensões mátricas. Quando o solo encontra-se saturado, os trabalhos internos são considerados nulos. A componente pressão deve ser considerada em solos saturados. A componente gravitacional será sempre considerada independente do tipo de solo.

Outras grandezas que representam as forças do solo sobre a água são carga (trabalho por unidade de peso) e pressão (carga aplicada ao peso específico).

A tensão mátrica ocorre inversamente proporcional ao conteúdo de água armazenada. O ponto máximo de armazenamento se dá quando a tensão é nula, ou seja, no ponto de saturação. Para solos que se encontram na zona não saturada, a água é retida nos poros do solo por interações entre as partículas do sistema, o que reduz o potencial energético da água no solo, principalmente pela capilaridade e adesão das moléculas de água na superfície dos sólidos (adsorção). A capacidade de campo pode ser definida como a máxima quantidade de água que o

solo é capaz de reter. A partir da capacidade de campo, a água percola para camadas mais profundas.

A relação entre o potencial mátrico e o conteúdo volumétrico de água no solo é definida pela curva de retenção de água no solo (CRAS), específica para cada tipo de solo devido às suas particularidades (Figura 1). As diferenças das curvas de retenção são atribuídas principalmente às distribuições dos tamanhos dos poros de cada tipo de solo; cada curva apresenta-se muito sensível a mudanças na densidade do material e distúrbios na sua estrutura (MIYAZAKI, 2006).

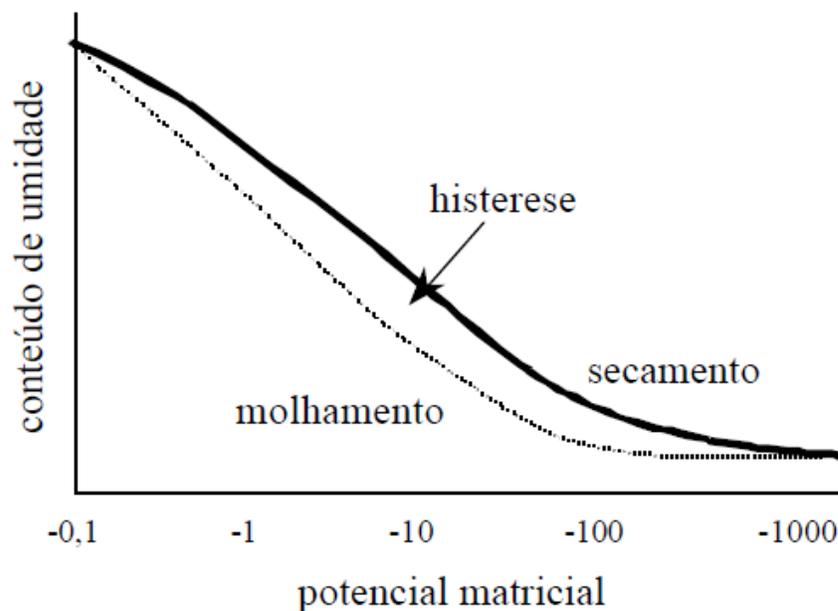


Figura 1-CRAS considerando as faces de secamento e molhamento

Fonte: RENNÓ e SOARES (2000)

Por meio da CRAS, conhecendo-se a umidade do solo em questão, pode-se estimar o potencial mátrico ou tensão mátrica. Porém, essa relação não é unívoca. As curvas de retenção de água no solo obtidas por molhamento e por secamento não são idênticas. A umidade do solo θ na condição de equilíbrio, a um dado potencial é maior na curva de secamento do que na curva de molhamento, esse fato é denominado *histerese*.

Para solucionar a questão, usa-se a curva de molhamento quando se tem infiltração e a curva de secamento quando se tem evaporação. Quando os dois fenômenos acontecem

simultaneamente, a *histerese* deve ser desconsiderada para a realização dos cálculos (REICHARDT e TIMM, 2004).

3.3 Dispositivos de medição do Potencial Mátrico

Dentre os dispositivos utilizados para medição do potencial mátrico em zona vadosa, ou mais conhecida como zona não saturada do solo, Rowlett (2000) destaca os psicrômetros, o papel filtro, os tensiômetros e placas de pressão. Cada instrumento de medida utiliza uma determinada variável mensurável e a relaciona com a tensão mátrica total de um solo.

Os psicrômetros são utilizados para medir o total de tensão mátrica de um solo a partir da umidade relativa do ar na fase porosa do solo. O papel filtro é um método indireto de medir tensão mátrica em que se utiliza a curva de retenção de umidade para o papel de filtro relacionando a umidade à tensão mátrica daquele solo. Os tensiômetros são aparelhos que medem diretamente a pressão negativa da água nos poros de um solo.

3.3.1 Psicrômetros

Segundo Rowlett (2000), os psicrômetros são utilizados para medir o total de tensão mátrica de um solo, a partir da umidade relativa do ar na fase porosa do solo. O potencial da água do solo é proporcional ao logaritmo natural da umidade relativa do ar do solo (obtida por técnicas psicrométricas). A determinação da umidade é feita da seguinte maneira: uma força eletromotriz pode ser produzida utilizando um circuito de dois diferentes metais a diferentes temperaturas. Ao passar uma corrente através de um circuito, feito com dois metais diferentes, uma das junções se torna mais quente, enquanto a outra junção torna-se fria. Em um psicrômetro (Figura 2), esse efeito é usado para refrigerar a junção de tal forma que uma gota de água se condense. Uma vez que uma gota de água é formada, a corrente é desligada. A diferença de temperatura entre as duas junções pode ser considerada como a tensão mátrica.

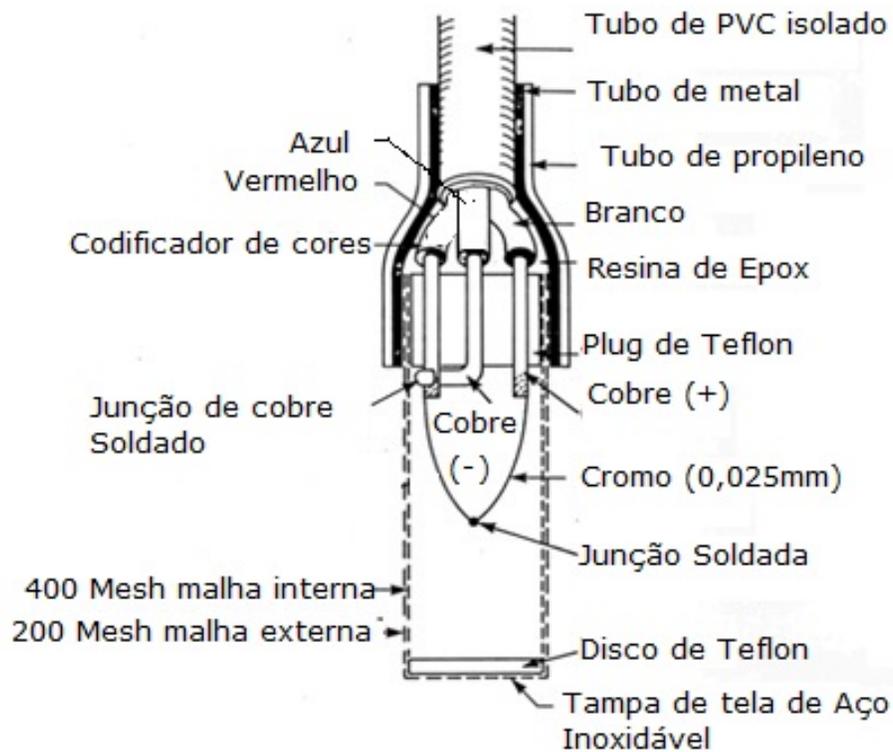


Figura 2-Esquema de um Psicrometro

Fonte: Marinho (2005)

Como a gota de água que evapora esfria um dos cruzamentos, a taxa de evaporação é função da umidade relativa do ar próximo a cruzamentos. Se a umidade relativa é baixa, a água irá evaporar rapidamente; caso contrário, a gota de água irá evaporar mais lentamente. A tensão mátrica máxima medida é estar relacionada com a tensão mátrica do solo (ROWLETT, 2000).

3.3.2 Papel Filtro

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), este é um método indireto de medir tensão mátrica que pode ser visualizado na Figura 3. O equilíbrio de potencial do papel filtro com o do solo, que é colocado sobre ou próximo do filtro de papel, o que faz com que o vapor de água flua para o papel que, posteriormente, terá seu teor de umidade determinado por pesagem. A curva de retenção de água para o papel filtro pode ser usada para determinar a tensão do solo.

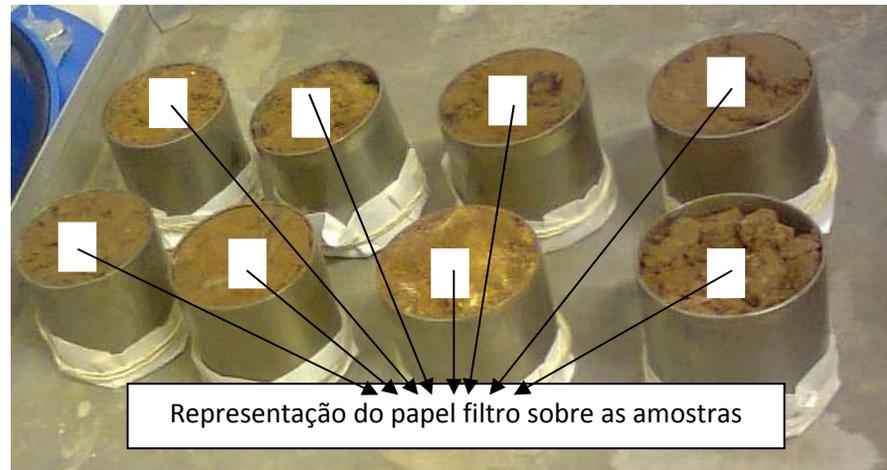


Figura 3-Foto das amostras alinhadas e representação do papel filtro sobre as amostras

Fredlund e Rahardjo (1993) verificaram que a tensão do solo pode ser medida dependendo do tipo de contato do papel de filtro com o solo. Se o papel filtro é suspenso acima do solo, serão determinados os efeitos combinados de tensões matricial e osmótica (tensão total). Se o filtro de papel está em contato direto com o solo, a tensão matricial é medida porque a água que entra no filtro de papel teria o mesmo potencial osmótico da água no solo. Assim, o potencial osmótico seria nulo.

O método do papel filtro para a mensuração da tensão do solo possui as vantagens de ser simples, ter um baixo custo e ter a possibilidade de mensurações de valores muito baixos. Como desvantagens, tem-se que a manipulação incorreta provoca erros de leitura e mensuração. A aplicabilidade do método do papel filtro para aplicações profundas é questionável devido às exigências de coleta da amostra. Isso exigiria um túnel de acesso, o que por si só, pode distorcer o fluxo na área a ser medida.

De acordo com Bulut & Leong (2008), o método do papel-filtro é uma técnica simples e confiável para a medição da tensão mátrica a partir do teor de umidade do papel-filtro.

O papel filtro possui curvas de retenção de água definida pelas fórmulas de Chander et al (1992):

para $w_p > 47\%$

$$\psi_p = 10^{(6,05 - 2,48 \log w_p)} \quad (8)$$

para $w_p \leq 47\%$

$$\psi_p = 10^{(4,84 - 0,0622w_p)} \quad (9)$$

nas quais w_p é o teor de umidade gravimétrica do papel e ψ_p é a tensão mátrica.

A partir da umidade medida no papel por meio da pesagem em balança de precisão, obtém-se a tensão mátrica correspondente que é igual à tensão mátrica da amostra. Assim, a curva de retenção de água no solo é determinada pelo conjunto de valores de tensão no papel filtro calibrados para a amostra e umidade da amostra.

3.3.3 Tensiômetro

Fredlund e Rahardjo (1993) descrevem-no como um instrumento composto de cerâmica porosa conectada a um dispositivo de medição de pressão por meio de um pequeno tubo que mede diretamente a pressão negativa da água nos poros de um solo. O tubo que constitui o tensiômetro é preenchido com água. O método de operação é colocar o dispositivo em contato direto com o solo. A tensão do solo puxa água através da cápsula porosa em cerâmica. O esquema do tensiômetro pode ser visto na Figura 4.

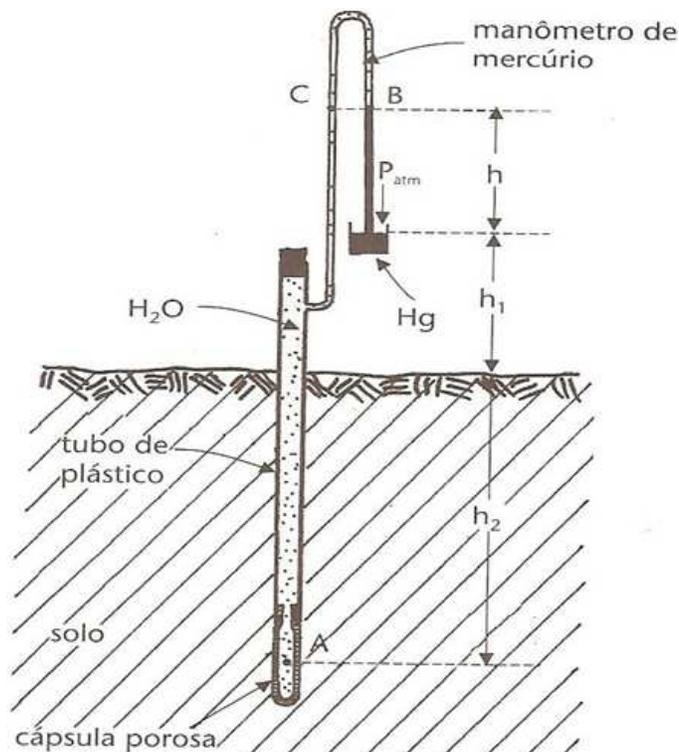


Figura 4- Esquema de um Tensiômetro

Fonte: Reichardt; Timm (2004)

Uma vez que o equilíbrio foi atingido, as pressões de água negativas dos poros podem ser medidas, utilizando um dispositivo de medição de pressão. As bolhas podem causar respostas lentas das mudanças na tensão no tensiômetro; por isso, o dispositivo exige manutenção periódica para retirar bolhas de ar do tubo de pequeno calibre.

Uma segunda preocupação é a perfuração de acesso que seria necessário para manter e ler o tensiômetros. O túnel de acesso em si perturba o regime de escoamento na área.

Como vantagens dos tensiômetros para mensuração do potencial mátrico apresentadas por Lanthaler (2004), destacam-se as informações fornecidas sobre o conteúdo de água e sua movimentação no solo. Porém, o tensiômetro possui um fator limitante quando se trata da faixa de pressão mensurada. Segundo Rowlett (2000) as medidas de pressão pelo uso de tensiômetros convencionais são limitadas a menos de 100 kPa, uma vez que há cavitação em valores de tensão de -100 kPa.

3.3.4 Placa de Pressão

A membrana ou placa de pressão de Richards, apresentada na Figura 05, consta de uma câmara de pressão ligada à atmosfera por intermédio de uma placa (ou membrana de cerâmica) sobre a qual é colocada a amostra do solo. A parte inferior à placa encontra-se continuamente sob pressão atmosférica $P_0 = 0$. A água do solo é retirada por pressão e pode alcançar altos valores de pressão, 15 atm (1500 kPa) ou mais (REICHARDT e TIMM, 2004).



Figura 5-Placa de Richards de alta pressão (esquerda) e baixa pressão (direita)

A amostra é disposta sobre a placa que já se encontra saturada e o solo é saturado com água por um período de 24 horas. Aplica-se uma pressão P_i à câmara que faz com que a água seja retirada do solo até que o equilíbrio se estabeleça. Nessas condições, o solo terá um teor de água θ retido a um potencial matricial ψ_m . A leitura do manômetro fornece diretamente o potencial matricial da água no solo na condição de equilíbrio. A operação é repetida para tantos valores de P_i necessários para se obter uma boa CRAS.

Segundo Reichardt e Timm (2004), há dois tipos de aparelhos: um denominado panela de pressão, para pressões $0 < P_i < 2$ atm, e outro com placa de alta microporosidade, denominado placa ou membrana de Richards, para pressões $1 < P_i < 20$ atm.

Para obtenção da curva de retenção, tradicionalmente, utiliza-se a câmara de pressão de Richards. Esse método, entretanto, apresenta algumas dificuldades: a determinação do ponto de equilíbrio entre a pressão aplicada e a água retida no solo, o contato amostra-placa, o longo tempo exigido para as medidas e o custo do equipamento (LUCAS et al. 2011).

3.4 Balanço Hídrico

3.4.1 Considerações Gerais

Vários processos interferem no escoamento superficial de água, como a infiltração, evaporação e evapotranspiração pelas plantas. Todos os processos citados são interdependentes e ocorrem, em sua maioria, simultaneamente. Para estudar esses processos, é necessário realizar o balanço hídrico, que pode ser definido como a diferença entre a quantidade de água que entra e o somatório da água que sai de um determinado volume de solo, em um dado intervalo de tempo. O resultado é a variação do volume de água que nele permanece.

$$P \times A - Q - R - E \times A = \Delta U \times Vol \quad (10)$$

Sendo:

A a área da bacia [L^2];

Vol o volume de solo [L^3];

P é a lâmina precipitada [L];

Q é o volume escoada [L³];

R é o volume drenado para a recarga direta [L³];

E é a evapotranspiração [L];

ΔU é a variação de umidade no solo [L³L⁻³]

Vol é o volume de água no solo [L³].

De modo geral, o balanço hídrico do solo tem os fluxos positivos que contribuem para o aumento da quantidade de água são provenientes da precipitação pluvial e de irrigação (quando houver). As saídas acontecem pelos processos de escoamento superficial, evapotranspiração e recarga direta.

3.4.2 Infiltração

Segundo Tucci (1993), infiltração é a passagem de água da superfície para o interior do solo. É um processo que depende da água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado da sua superfície e das quantidades de água e ar inicialmente presentes.

Reichardt e Timm (2004) denominam infiltração o processo pelo qual a água entra no solo e continua enquanto houver disponibilidade de água em sua superfície.

A capacidade de infiltração é dependente da umidade antecedente, da natureza e do estado da estrutura do solo superficial, sendo, portanto, afetada pelo tipo de vegetação e manejo. A velocidade do fluxo de água entre as camadas do solo é função da condutividade hidráulica, sendo esta função do teor de umidade das camadas (MENDONÇA, et al, 2009).

A condutividade hidráulica do solo define a capacidade do solo para transmitir água sob gradiente unitário. Em solos não saturados, a condutividade hidráulica é várias vezes menor que em solos saturados como pode ser representado na Figura 6.

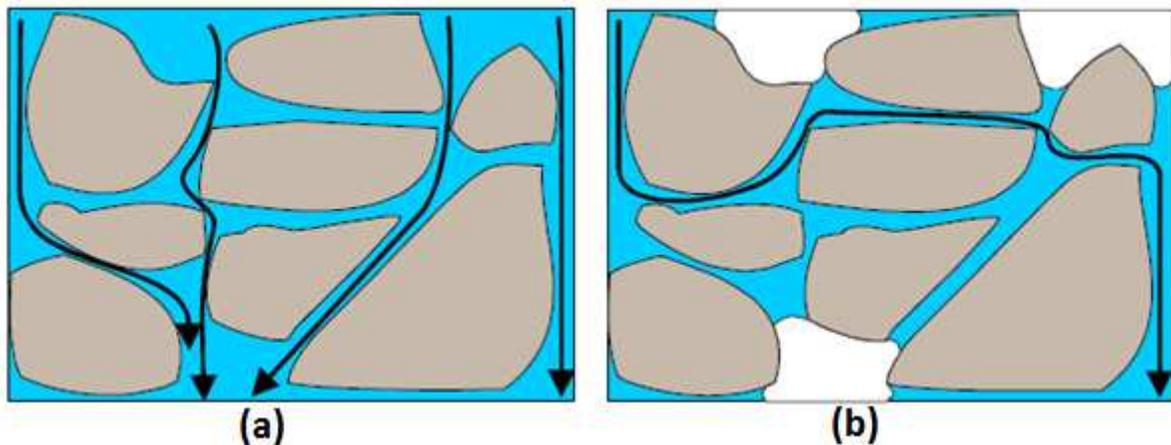


Figura 6-Efeito da saturação na condutividade hidráulica (a) fluxo de água em solo saturado (b) Fluxo de água em solo insaturado

Em solos não homogêneos, há a formação de camadas alternadas de materiais finos, por exemplo, com granulometria menor que 0,075 mm e camadas de materiais grossos com granulometria superior à 0,075mm. Esse fato somado à macroporosidade e instabilidade hidrodinâmica pode ocasionar a formação de caminhos preferenciais do fluxo de água no solo ou a variação da condutividade hidráulica entre as camadas.

Segundo Lanthaler (2004), os processos de infiltração, ascensão de água no solo e outras movimentações que podem ocorrer da água no solo podem ser descritos por meio de medidas diretas de tensão mátrica realizadas por meio de tensiômetros. Segundo Pruski, et al (2004), apesar de inúmeros estudos técnicos e científicos sobre a infiltração, alguns tópicos não são adequadamente tratados e não recebem a relevância que possuem em estudos deste tipo. Entre os tópicos estão a variação da capacidade de infiltração durante períodos com baixa intensidade de precipitação, o tempo de retenção para taxas de precipitação constante ou variável e a estimativa da chuva excedente sobre partes relativamente grandes de uma bacia hidrográfica.

O escoamento superficial se inicia quando a intensidade da precipitação incidente é superior à capacidade de infiltração de água no solo. Por esse motivo torna-se fundamental o conhecimento da capacidade de infiltração para a previsão do escoamento superficial diante de taxas variáveis de precipitação.

3.4.3 Escoamento Superficial

Para determinação da vazão escoada, calcula-se a fração da precipitação que se transforma em vazão. Em bacias não monitoradas, a determinação do escoamento é mais difícil e passível de grandes erros.

Segundo estudo realizado por *Water Resources Council*, citado por Bonta e Rao (1992), existe grande dificuldade de aplicação dos procedimentos para estimativa do escoamento superficial devido à grande imprecisão dos métodos costumeiramente utilizados e da variabilidade da estimativa.

A vazão específica depende de vários fatores característicos da bacia em estudo como declividade, rugosidade, tempo de concentração, tipo de solo e distância do nível freático. Esses fatores somados ao tipo de precipitação incidente são variáveis que devem ser observadas para a previsão do escoamento superficial. Dentre as variáveis, o estudo da infiltração do solo foi por um tempo negligenciado pela maioria dos métodos utilizados para a estimativa do escoamento superficial. Com as incertezas desses métodos, surge a necessidade da retomada dos estudos a fim de minimizar as discrepâncias entre os dados estimados e os realmente medidos.

Latron e Gallart (2008) analisaram o escoamento superficial direto em uma bacia pequena do Mediterrâneo por intermédio do registro contínuo de dados de nível saturado do solo, potencial mátrico da região e vazão do exutório superficial durante chuvas por seis anos. Em nível de escala diária, foram observadas fortes características de não linearidades entre precipitações e vazões do exutório e nos efeitos das precipitações sobre as variações de nível saturado. As medidas de potencial mátrico mostraram o aparecimento relativamente frequente de saturação com água aprisionada ainda na zona não-saturada no perfil de monitoramento (valores nulos e valores positivos), exercendo a contribuição favorável à produção de água na superfície (escoamento direto). Mas as medidas de potencial mátrico também mostraram valores favoráveis à retenção de água (valores negativos).

De acordo com Reichardt e Timm (2004), o escoamento superficial direto é estudado em rampas ou parcelas de solo padrão de 22,4 m de comprimento e 2 m de largura. Elas são cercadas por pranchas de madeira ou folha metálica e a água que escoar é coletada em tanques para a mensuração do volume. Em relação à área da rampa, o volume produzido fornece o valor da lâmina de escoamento em milímetros, sendo $\Delta S = V/A$ com V dado em litros e A, a área da

rampa em metros quadrados. Por outro lado, de acordo com Bergstrom (1990), pequenas amostras de solo podem não ser representativas do processo de interesse para experimentos de monitoramento. Monólitos grandes são uma opção melhor porque preservam a microestrutura e a macroestrutura do solo encontradas no campo (Meissner et al., 2010).

3.5 Lisímetros

O primeiro lisímetro¹ foi desenvolvido para verificar a infiltração de água no solo (LANTHALER, 2004). Lisímetros são aplicados na agricultura e na mineração para verificar as reações químicas da água no solo e fluxos de água no solo. O processo de extração de amostras para construção de lisímetros monolíticos cilíndricos com estrutura de aço inoxidável tem a finalidade de realizar estudos de hidrologia de superfície em solos agrícolas (ALLAIRE e BOCHOVE, 2006).

Vários autores Dvuk (1990); Kutilek e Nielsen (1994); Holting (1996); Haimmerl e Strobl (2004 *apud* LANTHALER, 2004) explanam sobre o uso de lisímetros. Por meio dos lisímetros, pode-se mensurar a infiltração diretamente e a movimentação de água no solo.

Lisímetros podem ser monitorados ou não monitorados; os primeiros fornecem informações sobre as mudanças do armazenamento de água no solo em qualquer tempo; já os segundos, apenas o volume percolado de água no solo da coluna. A percolação de água é coletada por lisímetros de gravidade ou mensurada por meio de lisímetro de pressão.

Os diversos tipos de lisímetros podem ser utilizados para realizar diversas medições entre elas: realização do balanço hídrico para a determinação da evapotranspiração, a determinação do conteúdo de água infiltrada, recarga de lençol subterrâneo em diferentes tipos de solo, mensuração do potencial mátrico, monitoramento do movimento de água no solo, identificação da velocidade de infiltração de água e a taxa de infiltração em solos saturados e não saturados.

As limitações e erros dos lisímetros são provenientes de extrapolação dos dados obtidos para áreas muito grandes que não representam às características do solo e vegetação do lisímetro; à formação de caminhos preferenciais, ou “by-pass”, ao redor ou dentro do próprio lisímetro; ao

¹ Dispositivos isolados hidrologicamente do solo circundante preenchidos com amostras indeformadas ou deformadas de solo, coberto com vegetação natural ou cultivada.

efeito de borda, que é ocasionado principalmente quando a superfície externa do lisímetro fica exposta e aquece, aumentando a evaporação dentro do lisímetro. Todos esses erros e limitações podem ser minimizados com a correta utilização do instrumento para cada finalidade a que se propõe, lembrando que não existe um “lisímetro ideal”. Cada tipo possui vantagens e desvantagens quanto ao uso.

3.5.1 Lisímetro Pan ou Ebermayer

Este tipo de instrumento é utilizado para a coleta de água para análise química e é instalado ao lado de um túnel escavado em um buraco na sua parede e, em seguida, preso contra o solo. O tabuleiro permanece no local e pode-se recolher a água que é percolada através do solo (Figura 7).

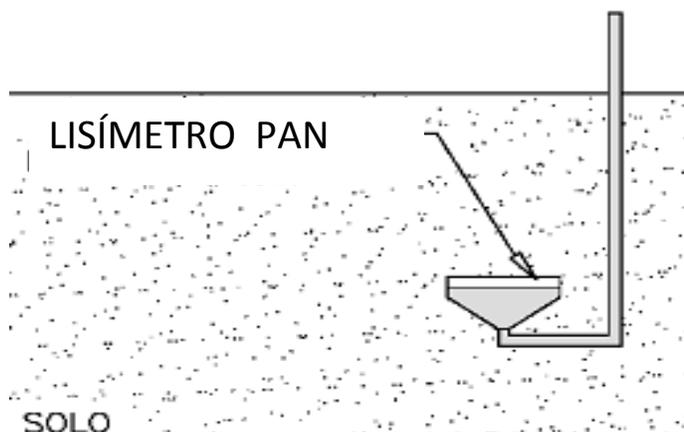


Figura 7-Lisímetro pan com a retirada de água por tensão

Fonte: Adaptado de Krejst et al.(1994 apud Rowlett (2000)

Pesquisadores perceberam que esse tipo de lisímetro tem uma falha de projeto básico. Em solos saturados, a tensão no solo fará com que a maioria da água seja desviada em torno do recipiente de coleta. A água que não pode ser desviada em torno do lisímetro pan (devido à baixa condutividade hidráulica de materiais não saturados) causará uma camada saturada sobre o recipiente. Uma vez que o nível freático foi restabelecido, o lisímetro pan vai coletar água. Mesmo nesse caso, no entanto, o fluxo de água no solo é perturbado pela presença do lisímetro e a quantidade de água que é recolhida no lisímetro não reflete a quantidade real de água que atravessa o solo.

3.5.2 Lisímetro de Pesagem

Utilizado para estudar a evapotranspiração e para o estudo do movimento vertical da água no solo, o lisímetro de pesagem é construído pela montagem de um recipiente de grande porte para pesagem como apresentado na Figura 8.

O lisímetro de pesagem é enterrado no solo para que as bordas superiores fiquem niveladas com o terreno circundante e então aterrado com material que é semelhante ao do solo adjacente. Um túnel é também construído para permitir o acesso ao fundo do lisímetro para que sejam realizadas as leituras.

Além da pesagem, o lisímetro de pesagem é utilizado para medir o movimento da água. Esses lisímetros podem ser instrumentados com tensiômetros e outros dispositivos para medir as variações de tensão mátrica ao longo do tempo. A premissa básica do projeto é que ao montar o dispositivo nivelado com a superfície do solo, qualquer infiltração ou evapotranspiração que ocorre nos solos devem ocorrer também no lisímetro. A água movimentada entre o limite de superfície pode ser calculada a partir da diferença do peso total do lisímetro, que é medida em uma balança ou célula de carga.

Os lisímetros de pesagem podem ser classificados em vários subgrupos com respeito à forma como a amostra é colocada no lisímetro. Em um lisímetro comum, as camadas de solo são reconstruídas manualmente, enquanto no lisímetro monolítico um bloco monolítico de solo é cuidadosamente escavado e colocado no instrumento. Uma variação do último é o microlisímetro. A palavra micro não se aplica ao lisímetro em si, mas representa microambiente. Nesse tipo de lisímetro, um bloco monolítico de solo é colocado em um lisímetro de pesagem localizado em um laboratório, onde o ambiente do lisímetro pode ser controlado, criando assim um microambiente (ROWLETT, 2000).

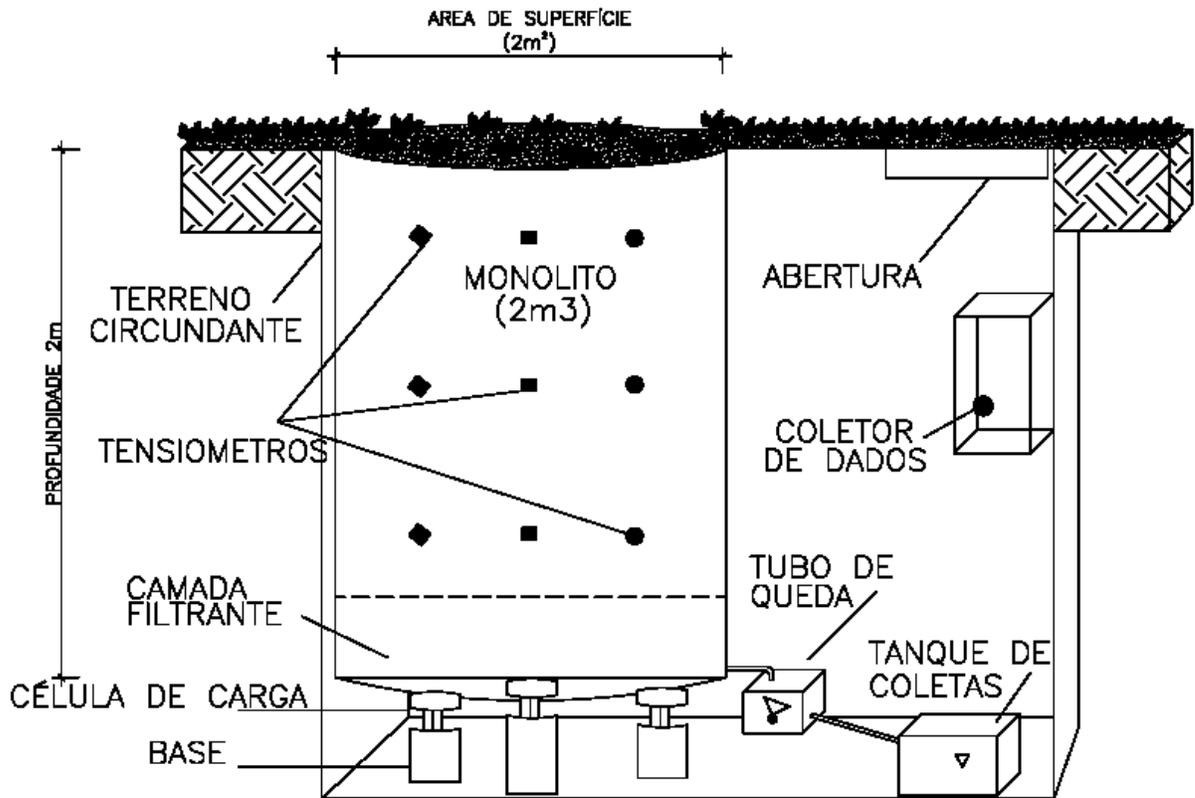


Figura 8-Lisímetro de pesagem
Fonte: Adaptado de Meissener (2008)

3.5.3 Lisímetro de Tensão

Utilizado para a coleta de amostras de água em solos não saturados, o método de aplicação de tensão mátrica do solo geralmente consiste na aplicação de um vácuo (pressão negativa) dentro do lisímetro (Figura 9).

Para utilização do lisímetro de tensão, um material poroso deve ser utilizado como contato entre o lisímetro e o solo. Permite uma fase aquosa contínua entre a água dentro do lisímetro e do solo. É aplicada uma sucção na parte superior do lisímetro que faz com que a água contida no local de contato do lisímetro com o solo seja deslocada pelo lisímetro e possa ser coletada na superfície, acima do solo.

A característica comum de todos os projetos é a aplicação de um vácuo ou uma tensão mátrica ao solo para coletar uma amostra de água. A variedade mais comum de lisímetro de

vácuo é o lisímetro de cerâmica (ROWLETT, 2000). A geometria dos lisímetros pode variar de placas redondas e quadradas para tubos quadrados em formas e tamanhos diferentes.

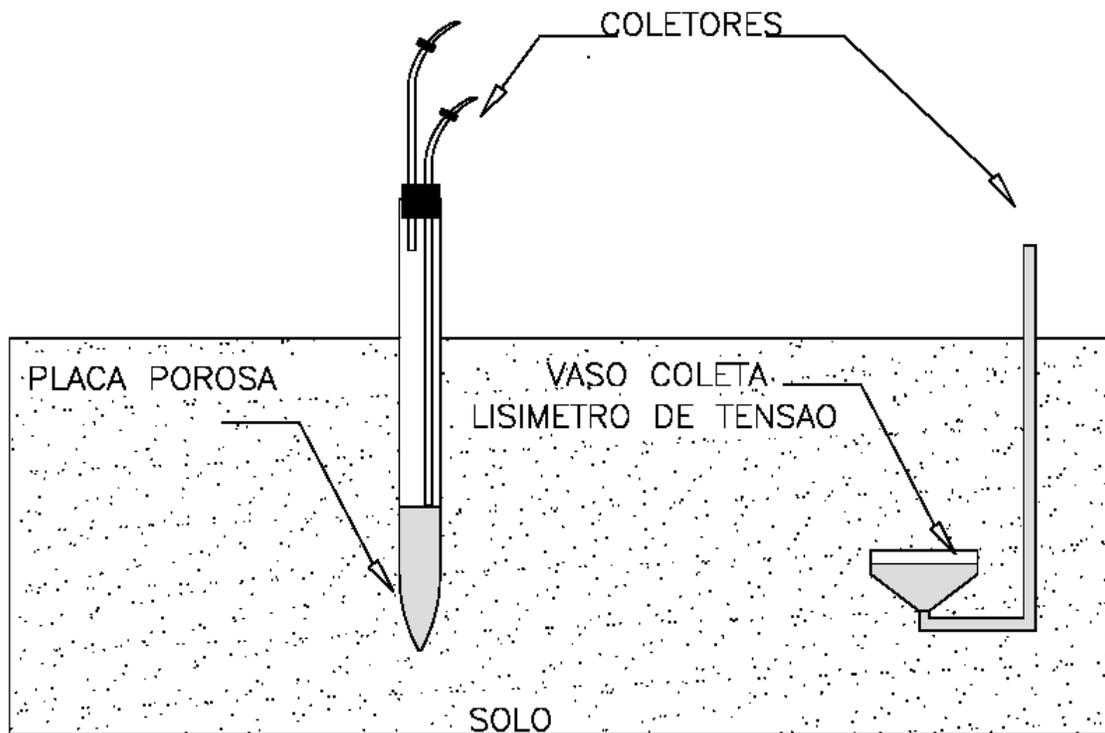


Figura 9- Lisímetro de tensão mátrica
Fonte: Adaptado de Krejst et al.(1994 apud Rowlett (2000))

3.5.4 Lisímetro de Gravidade

Os lisímetros de gravidades representam uma classe que mensuram o fluxo por meio de uma determinada área, recolhendo a água que flui. O método de recolha de água, apresentado na Figura 10, consiste em permitir que a gravidade exerça uma força na água que é armazenada na base do lisímetro.

A quantidade de água que entra no lisímetro é medida através da determinação da altura do nível freático dentro do lisímetro ou pelo volume de água colhido em sua na base. Apresentam a mesma falha de projeto que lisímetros pan em solos não saturados. Felizmente, esses problemas podem ser atenuados por meio de um projeto próprio (ROWLETT, 2000).

Experimentos em coluna de solo comumente utilizam taxas de irrigação insuficientes para a produção de deflúvio. Nichol et al. (2008) propôs um lisímetro de laboratório para ensaios de infiltração estacionária em solos profundos.

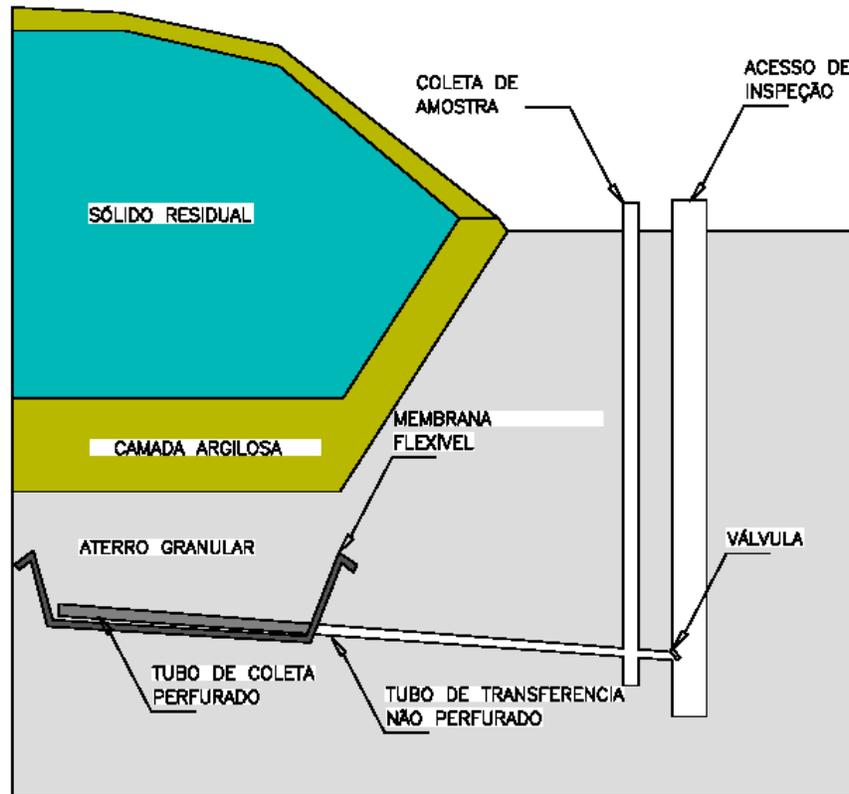


Figura 10-Lisímetro de gravidade

Fonte: Adaptado de Gordon et al. (1989 apud Rowlett (2000))

3.5.5 Critérios de projeto de lisímetros

Rowlett (2000) citou alguns parâmetros chave para o projeto de lisímetros que incluem a altura da parede do lisímetro, material de preenchimento e largura. Bews (1997) determinou que uma boa altura da parede é função do intervalo esperado de coleta de água percolada e da altura necessária para desenvolver a tensão mátrica do solo, acima do nível freático artificial do lisímetro.

O volume de água percolada esperado pode ser estimado a partir da taxa de infiltração e da condutividade hidráulica. Para que o lisímetro não afete o regime de escoamento na área circundante, a tensão mátrica na parte superior do mesmo deve ser igual a tensão mátrica do solo

no entorno do solo da área em que se encontra o instrumento. A escolha da altura mínima da parede correta é uma questão de conversão da tensão mátrica máxima esperada em kPa a uma altura equivalente como por exemplo, 10 kPa de tensão mátrica do solo exige uma altura mínima da parede de 1,02 m.

A largura do lisímetro só se torna um fator crucial para o design quando os gradientes internos e externos do lisímetro não são iguais. Nesse cenário, um lisímetro mais largo irá reduzir os impactos dos efeitos de borda. Assim, lisímetros utilizados na medição da infiltração devem ser construídos tão largos quanto possível para reduzir os prováveis erros devido aos efeitos de borda (ROWLETT, 2000).

Para avaliação da qualidade da água no solo, Lanthaler (2004) sugere a coleta de amostras por meio da aplicação de vácuo em lisímetros de pressão ou por lisímetros de gravidade, dispositivos localizados em profundidade no solo para captação de solução de solo.

Rowlett (2000) verificou diferentes taxas de infiltração em um lisímetro contendo variados perfis de solo com tensões mátricas diversas. Para cada perfil, a taxa de infiltração e tensão mátrica das colunas de solo foram medidas utilizando tensiômetros e lisímetros de drenagem em sua base e finalmente as medições de tensão mátrica, volume de água e tempo necessários para coletar uma amostra foram então comparadas e avaliadas. Após o ensaio da coluna de solo, Rowlett (2000) verificou que o lisímetro pode ser usado para medir a tensão mátrica dentro das colunas de solo. A medida de tensão mátrica encontrada no lisímetro foi um pouco menor do que a de tensão mátrica obtidos com tensiômetros, com um erro de menos de 1 kPa na tensão mátrica inferior a 10 kPa e um erro inferior a 2 kPa para tensões mátricas entre 10 e 20 kPa. As taxas de recolha do fluido dos poros para o lisímetro aumentou com o aumento do fluxo aplicado.

Bond e Rouse (1985) descrevem o uso de um lisímetro de vácuo (projeto básico igual a de um tensiômetro) no acompanhamento da química de efluentes de lixiviação e locais de rejeitos. A profundidade do lisímetro deve ser limitada de tal forma que a tensão mátrica no final de cravação do tensiômetro seja inferior a 100 kPa, de modo que a água não cave.

Nichol et. al. (2008) testaram um lisímetro projetado para medir a tensão mátrica na faixa de 0 a 30 kPa como estratégia de avaliação alternativa em relação aos tensiômetros. Um protótipo preliminar de 0,56 m de diâmetro e 3,6 m de altura subestimou a tensão mátrica de 4 a 12% em relação aos tensiômetros. Foram desenvolvidas melhorias no design do lisímetro, usando

modelagem numérica, que melhoraram a acurácia em $< \pm 2,5\%$ de erro, semelhante ao encontrado para outros sensores de tensão mátrica. O estudo desse lisímetro foi originado da necessidade de mensuração em períodos longos de tensão mátrica em solos não saturados de uma mina de urânio, no norte de Saskatchewan. A taxa de infiltração foi delimitada entre $1 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ (equivalente a 100% de uma precipitação de 300 mm h^{-1}) e $1 \times 10^{-10} \text{ m s}^{-1}$ (1% da precipitação média). A taxa de infiltração variou de acordo com a granulometria do material. O trabalho foi realizado com solo simulando uma pilha de estéril com granulometria maior e não saturado. Foi utilizada farinha de sílica no interior do lisímetro para direcionar o fluxo de água para seu interior. Após a infiltração da água, pôde-se quantificar a água na parte inferior do lisímetro.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de Estudo

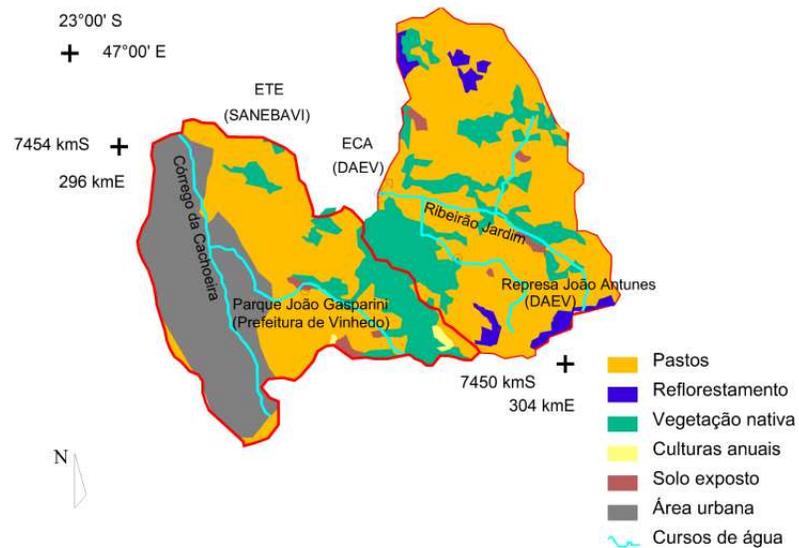
A coleta de material para o lisímetro de laboratório foi realizada na Represa João Antunes dos Santos, localizada na bacia do Ribeirão Bom Jardim, afluyente do córrego Cachoeira, com área de, aproximadamente, 22,5km², às coordenadas 23° 01' 57,16" S e 46° 57' 59,29" L à altitude de 760 metros (Figura 11), no município de Vinhedo, São Paulo.

O clima na região sofre influência das massas de ar atlânticas polares e tropicais, provocando diferenças regionais dadas pela distância em relação ao mar e por fatores topoclimáticos, como as serras do Japi e de São Pedro. Em toda a região das Bacias PCJ predominam os ventos do sul. De modo geral, o clima é do tipo quente, temperado e chuvoso. Na região em estudo, pode-se verificar que o clima é Subtipo Cfa - sem estação seca e com verões quentes. Os índices de precipitação pluviométrica, na média, variam entre 1.200 e 1.800mm anuais (SÃO PAULO, 2011).

De acordo com a Agência de Água PCJ (2007), o solo da região em estudo é predominante argissolo vermelho amarelo. O município de Valinhos possui uma elevação de 440 a 700 metros. Os municípios de Valinhos e Vinhedo estão sob domínio da Mata Atlântica, conforme Decreto 750/93, pois possuem toda a sua área inserida neste bioma. Este bioma encontra-se ameaçado devido à expansão urbana e agrícolas. Sua preservação torna-se importante para a manutenção de espécies ameaçadas de extinção e pela preservação da biodiversidade. A vegetação natural remanescente da região de Valinhos e Vinhedo predominante é Floresta Ombrófila Densa com área total de 1.089 ha em Vinhedo e 1.756 ha em Valinhos (IF, 2005 apud AGÊNCIA DE ÁGUA PCJ, 2007). A maior parte da vegetação remanescente da bacia PCJ, 86,9%, apresenta fragmentada em áreas de, no máximo, 20 ha cada fragmento. O relevo é plano ondulado.



(a)



(b)



(c)

Figura 11 - Localização das bacias hidrográficas do córrego Bom Jardim: (a) localização entre as bacias do estado de SP e (b) localização das bacias hidrográficas do córrego Bom Jardim e (c) local da área de estudo

A bacia do Ribeirão Jardim é ocupada por 7,0 km² de áreas de vegetação nativa e reflorestamento e o restante da área é ocupada por pastos e áreas de solo exposto isoladas. A bacia é responsável pelo abastecimento do município de Valinhos, mas, sem o reconhecimento como Área de Proteção Ambiental, tem permitido a implantação de empreendimentos residenciais. O córrego Cachoeira atravessa os municípios de Vinhedo e Valinhos e sua bacia tem sido ocupada primeiramente pela área urbana de Valinhos, que possui 107 mil hab. e taxa de crescimento anual de 0,7% e ultimamente por Vinhedo, que possui 63 mil hab. e cresce a taxa anual de 2,5% (IBGE, 2000, 2010).

4.2 Construção do Amostrador

A estrutura do amostrador foi construída em aço inoxidável ASTM (American Society for Testing and Materials) A 240 de 3,0 mm de espessura, com 600 mm de diâmetro e 1800 mm de altura para ser pressionado diretamente contra a superfície do solo e abrigar a amostra indeformada à umidade natural. Segundo DAS (2011) o monolito é indeformado quando o índice de área está entre 0 e 10%. O índice de área (% A) pode ser calculado pela equação:

$$\% A = \frac{D_o^2 - D_i^2}{D_i^2} \quad (11)$$

Em que:

D_o = Diâmetro externo da amostra

D_i = Diâmetro interno da amostra

Para D_o de 600mm, e espessura (e) de 3mm, tem-se D_i de 594mm ($D_o = D_i - 2e$), o índice de área é 2%, está entre 0 e 10%, portanto pode ser considerado indeformado (DAS, 2011).

Estimativas de resistência à flambagem determinaram uma capacidade de esta estrutura suportar um esforço axial de 70.000 kgf. O esforço de cravação do amostrador no terreno deve vencer a resistência à penetração do solo (R em kgf) que é obtida como resultado da combinação das resistências de atrito e de ponta aplicando-se a fórmula de Schenck (Caputo, 1988b):

$$R = \frac{2}{3} (R_p + R_a) \quad (12)$$

Sendo R_p a resistência de ponta dada pelo produto da área de contato da base do amostrador (F) pela tensão de ruptura do solo neste trabalho definida com q_s :

$$R_p = F \times q_s \quad (13)$$

A resistência do solo ao deslocamento da parede do amostrador por atrito (R_a) dada pelo produto entre o perímetro de contato da parede do amostrador com o solo (U), a espessura da camada de solo (l) e a tensão de atrito admissível entre o solo e o amostrador (q_{rm})

A partir dos valores da espessura das paredes do amostrador (0,3 cm) e do seu perímetro interno (U = 188,5cm) tem-se F = 56,5 cm². O solo possui duas camadas, sendo areia siltosa (0,8m) no topo e silte arenoso até o fundo (1,9 m). De acordo com Caputo (1987), os parâmetros do solo fornecem q_s igual a 20kgf/cm² para silte arenoso e q_{rm} igual a 0,30kgf/cm² e 0,45 kgf/cm², respectivamente para solo areia siltosa e silte arenoso. Então, tem-se pela fórmula de Schenck, R igual a aproximadamente 15.000kgf, sendo R_p aproximadamente 1.120kgf e R_a , aproximadamente 13.800kgf. Observa-se que a o esforço de cravação é menor que a resistência da estrutura do amostrador à flambagem.

Próximo ao topo, a estrutura cilíndrica possui oito aberturas equidistantes com 118 mm largura por 50 mm de altura, posicionada 50 mm abaixo da borda. A base do amostrador é esmerilhada para reduzir a resistência de ponta e facilitar o avanço no solo.

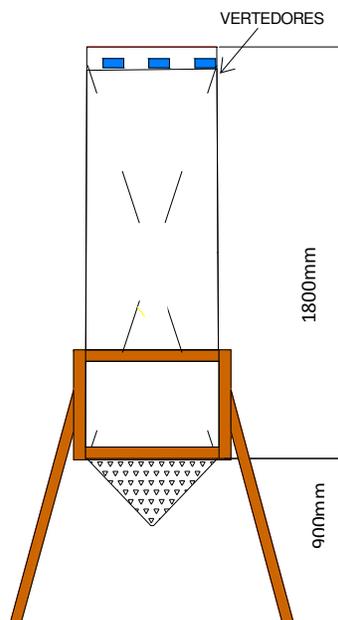


Figura 12- Esquema do Cilindro Amostrador e suporte de aço carbono

A amostra é instalada sobre suporte metálico em estrutura de aço carbono (Figura 12) para mantê-lo elevado em relação ao piso com altura suficiente para receber no fundo um cone afunilado (450 mm) e uma proveta (300 mm). A estrutura do suporte é articulada para permitir o encaixe do lisímetro frontalmente.

4.3 Adaptação para a Extração da amostra

A resistência à penetração obtida demonstra que o esforço estático de 5000Kgf seriam insuficiente e que a cravação deve ser feita com auxílio de percussão. A pressão de cravação é distribuída na borda através de uma placa composta por chapa e viga em aço carbono. Uma segunda placa, idêntica, foi confeccionada para auxiliar na etapa de retirada e içamento da amostra.

O processo de extração da amostra adotado neste trabalho sofreu algumas adaptações como percussões devido à coesão do solo, utilização de graxa no interior do amostrador, escavação externa ao amostrador durante a cravação e transporte da amostra do campo para o laboratório para instalação.

O solo utilizado para o lisímetro do presente trabalho foi extraído a aproximadamente 20 m da margem do lago da represa João Antunes (Figura 11 b) no dia 01/03/2012. Antes de extrair a amostra indeformada de solo, foi necessário realizar uma sondagem a trado manual no terreno até a profundidade de 2,0 m. Na sondagem não foram verificadas rochas e o nível de água não foi atingido. Com auxílio de uma retroescavadeira pesando aproximadamente 10.000kg (capaz de exercer um esforço estático contra o solo de 5.000kg em dois apoios), a estrutura do amostrador (lisímetro sem instrumentação) foi pressionada verticalmente com posicionamento feito conforme pode ser visto na Figura 13.



Figura 13-Posicionamento do Cilindro do Amostrador para Cravação no Solo

A cravação e extração ocorreram sobre uma superfície plana distante no mínimo 4,7 m das copas das árvores cuja altura em média é de 10 m, aproximadamente para evitar a influência das raízes das árvores. Para vencer o atrito provocado pelo empuxo do solo sobre as paredes, baixando para o limite de esforço de uma escavadeira, foi aplicada graxa na parede interna da estrutura do lisímetro. Devido às características do escoamento laminar da água no solo, o uso de graxa não altera a função hidráulica da parede interna do amostrador, cuja função é apenas de isolamento. Eventualmente a graxa produzirá um efeito no teor de matéria orgânica restrito a uma camada próxima à parede. Esse efeito não será significativo no domínio da amostra de solo devido à pequena relação da espessura de graxa com o diâmetro da amostra.

Aos 0,8 m de profundidade, iniciou-se a escavação em torno da estrutura, para aliviar o empuxo externo do solo (Figura 14). Devido à remoção do apoio do empuxo do solo, foi necessário que um operário escorasse o amostrador para que ele mantivesse a posição vertical durante a escavação.



Figura 14-Escavação manual em torno do Amostrador

Com a escavação foi possível observar à profundidade de 0,8m a presença de fragmentos de rocha com aproximadamente 0,15 m de diâmetro. Adicionou-se 30,0 litros de água e aguardou-se 45 minutos como uma tentativa de incremento de poro-pressão à tensão de ruptura do processo de cravação.

À profundidade de 1,1 m, encontrou-se uma camada de solo com fragmentos de rocha que dificultou o trabalho e aumentou significativamente o tempo gasto para a escavação e extração da amostra.

A cravação de um amostrador com comprimento em escala de campo (1,7m) provoca tensões no perímetro de corte e nas paredes pela face interna e externa. Os efeitos da resistência do solo na cravação são crescentes ao longo da penetração da amostra, em função do aumento de resistência à penetração do solo com a profundidade.

Com o aumento da resistência do solo foram apresentadas deformações na borda superior do amostrador durante a penetração, que eram corrigidas também ao longo da descida.

Esses danos podem ser evitados por intermédio de um reforço estrutural na borda superior do amostrador.

Com auxílio de uma peça de cavar, foram rompidos os fragmentos encontrados à borda da parede do amostrador sendo este procedimento realizado a cada 0,1 m. A cravação prosseguiu até 1,9 m de profundidade do terreno, até que fosse nivelado o topo da amostra à base das aberturas, obtendo-se, a 1,7m profundidade para a amostra. Ao todo foram empregadas na cravação 4,25 h de trabalho por três homens mais uma retroescavadeira.



Figura 15-Rebaixamento do Conteúdo do Lisímetro em Relação ao Nível do Terreno

Após a cravação foi observado uma diferença do topo do lisímetro e do nível do terreno de 0,2m (Figura 15) que corresponde ao amolgamento sofrido pela amostra.

A retirada, içamento e transporte da amostra foram feitos com o auxílio de um caminhão munk. A amostra foi içada com o auxílio de quatro cintas de 1.000kgf e posicionada no caminhão fixada com cordas. O trajeto de 33,8km desde a represa João Antunes em Valinhos até o laboratório de Hidrologia da UNICAMP foi percorrido com velocidade mínima útil (30 a 60 Km/h).

A instalação do amostrador no salão do laboratório (aproximadamente 40m² de área e pé direito de 3,25m) foi realizada com o auxílio de equipamentos manuais de movimentação de carga: empilhadeira e talha de trole, ambos de 1000kgf. Os procedimentos de escavação,

transporte e instalação do amostrador foram realizados dentro de um período de 6,25 horas mais o transporte do campo até o laboratório.

4.4 Caracterização do solo

4.4.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica do solo é necessária para verificar a textura do solo e foi realizada levando em consideração a ABNT NBR 7181-1984 com a utilização de defloculante. Foram coletadas 16 amostras indeformadas de solo a trado manual em 4 perfis, nas profundidades de 0,25; 0,75; 1,25 e 1,75 m, formando um quadrado de lado igual a 1 m distantes 4 m (Figura 16) do local de extração da amostra de solo indeformada do lisímetro.



Figura 16-Escavação manual em torno do Amostrador

4.4.2 Ensaio para obtenção da Curva de Retenção de Água no Solo

4.4.2.1 Ensaio com o papel-filtro

A execução do ensaio com o papel-filtro foi realizada para mensurar o teor de umidade inicial de 8 amostras indeformadas logo após a retirada em campo, empregando-se papel-filtro Whatman n° 42. As amostras, retiradas com amostrador Uhland cilíndrico de dimensões de 66mm de diâmetro com espessura de 1,5mm cujo índice de área (% A) é de 10% (Equação 11)

são consideradas deformadas de acordo com DAS (2011). As amostras foram retiradas ao longo dos Perfis 3 e 4 (Figura 16) nas profundidades de 0,50; 1,00; 1,50 e 2,00 m de profundidade com a utilização de um mostrador dinâmico, utilizando anéis de 0,05m de diâmetro e 0,07m de altura. Para cada medida de potencial matricial, foram utilizados dois papéis filtro, um de cada lado de cada amostra de solo e realizada a média dos valores encontrados.

Separaram-se 8 amostras de solo em sacos plásticos e as colocou dentro de um recipiente plástico com tampa. Este recipiente foi fechado e acondicionado em temperatura ambiente, por um período de 15 dias para garantir o equilíbrio termodinâmico da água no sistema solo/papel-filtro. Ao fim do período de equilíbrio, retirou-se o papel filtro e realizou as medidas de sua massa e determina-se o teor gravimétrico de umidade, do papel. Nesse procedimento, o manuseio do papel-filtro de cada montagem ocorreu em até 5 seg. Ao término do ensaio, após a manipulação dos papéis-filtro, as amostras de solo foram secas em estufa a 105 °C, por 24 h, e tiveram suas massas aferidas, para determinação da umidade gravimétrica destas.

A curva de retenção de água no solo é obtida relacionando os valores de umidade da amostra com as tensões encontradas no papel filtro calibradas pelas equações 8 e 9 (Chandler et al, 1992).

4.4.2.2 Ensaio com câmara de Richards

Para efetuar o ensaio da câmara de Richards, foram utilizadas duas painelas, uma de alta e outra de baixa pressão. Na painela de baixa pressão, as amostras de solo foram submetidas às pressões de 1, 2, 5, 10, 30, 60 e 100 kPa e na painela de alta pressão de 200, 300, 400, 600, 800, 1048 kPa com um intervalo de 7 dias para garantir o equilíbrio termodinâmico da água no sistema.

Para a realização da curva de molhamento, primeiramente 8 amostras indeformadas (Perfis 3 e 4 nas profundidades de 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 m), retiradas com amostrador dinâmico, foram colocadas na painela de alta pressão sob valores decrescentes. Durante 14 dias as amostras ficaram sob a pressão de 1048kPa, maior pressão conseguida pela painela utilizada no experimento para garantir que entrasse em equilíbrio termodinâmico com o solo. Após essa etapa, semanalmente foram reduzidas as pressões e mensuradas as massas das mesmas.

Para realizar a curva de secamento, outras 8 amostras indeformadas (Perfis 1 e 2, ver Figura 15, nas profundidades de 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 m), retiradas com amostrador dinâmico,

ficaram em uma câmara úmida para garantir a retenção máxima de água em todo o seu perfil por 14 dias. Verificado o equilíbrio termodinâmico das amostras, foram colocadas na câmara de baixa pressão inicialmente, aumentando-se as pressões semanalmente até a troca para a câmara de alta pressão.

4.4.3 Porosidade (intrusão de mercúrio)

O ensaio de porosidade por intrusão de mercúrio no solo foi realizado utilizando 16 amostras indeformadas de solo, coletadas com amostrador Uhland em 4 perfis, nas profundidades de 0,25; 0,75; 1,25 e 1,75 m, formando um quadrado de lado igual a 1 m distantes 4 m (Figura 15) do local de extração da amostra de solo indeformada do lisímetro. As amostras de solo foram encaminhadas ao laboratório de materiais cerâmicos do Instituto de Física de São Carlos da USP (Universidade de São Paulo) para a realização do ensaio. A técnica de intrusão de mercúrio consiste em introduzir mercúrio no solo com aplicação de pressão. Não sendo capaz de molhar a maioria dos sólidos conhecidos, o mercúrio só penetra nos poros dos materiais. A pressão utilizada será tão mais alta quanto menor for o tamanho do poro do solo (TEIXEIRA, COUTINHO e GOMES, 2001). Dependendo da distribuição do tamanho dos poros, tem-se o predomínio de macroporosidade em que as forças gravitacionais e capilares predominam ou de microporosidade em que predominam as forças de adsorção na retenção de água no solo.

4.4.4 Densidade dos sólidos

A densidade dos sólidos é a relação entre a massa das partículas sólidas e seu volume, seu ensaio é padronizado pela norma NBR 6508/84 de densidade dos sólidos. Foi determinado em laboratório através da utilização de um picnômetro. Pesou-se a amostra seca e colocou-a no picnômetro, completando o volume com água. Sabendo que a densidade da água é $1,0\text{g/cm}^3$, pode-se inferir que a diferença da massa do picnômetro preenchido apenas com água do picnômetro com água e solo é a diferença de volume. Determinados a massa e o volume das partículas sólidas, pôde-se calcular a densidade dos sólidos.

4.5 Instrumentação do Lisímetro

O amostrador foi equipado com simulador de chuva (reservatório com água destilada, bomba centrífuga e microaspersores), instrumentos de mensuração (rotâmetro, tensiômetros e pluviógrafo) e coletores (vertedores, calhas, reservatório de coleta e proveta) para a saída do excesso de água (Figura 17). O lisímetro, amostrador já instrumentado, foi instalado no Laboratório de Hidrologia da UNICAMP, conforme Figura 18.

Foram instalados seis minitensiômetros, marca UMS modelo SWT5, distribuídos em um perfil vertical com cinco pontos, a cada 0,19 m nas profundidades de 0,19; 0,48; 0,77; 1,06; 1,35m e mais um ponto adicional a 0,481 m de profundidade para representar as variações observadas no perfil do terreno (Figura 16). As leituras foram armazenadas em um registrador com capacidade para os mesmos seis tensiômetros. Estes tensiômetros possuem capacidade para mensurar a poro pressão entre -85 e 100 kPa e são projetados especialmente para medições pontuais em colunas de solo, vasos e lisímetros de laboratório. Possuem hastes de 20cm de comprimento com uma superfície ativa de apenas $0,5$ cm² e um diâmetro de 5 mm. Estas características permitem ao instrumento atingir o terço médio do diâmetro do lisímetro com o mínimo distúrbio do solo.

A resistência do escoamento superficial foi controlada por meio de um vertedor posicionado no topo do lisímetro. O volume não infiltrado foi extravasado por meio de oito vertedores retangulares de abertura lateral regulável, com base nivelada ao topo da amostra. Estes vertedores permitem representar as condições hidráulicas do terreno, por meio de analogia entre as propriedades hidráulicas da superfície e dos vertedores. O volume de água não infiltrado foi monitorado ao longo do tempo por meio de um pluviógrafo, Campbell modelo TE525MM, instalado na saída da tubulação de coleta. Uma proveta foi utilizada para a coleta do volume percolado do lisímetro.

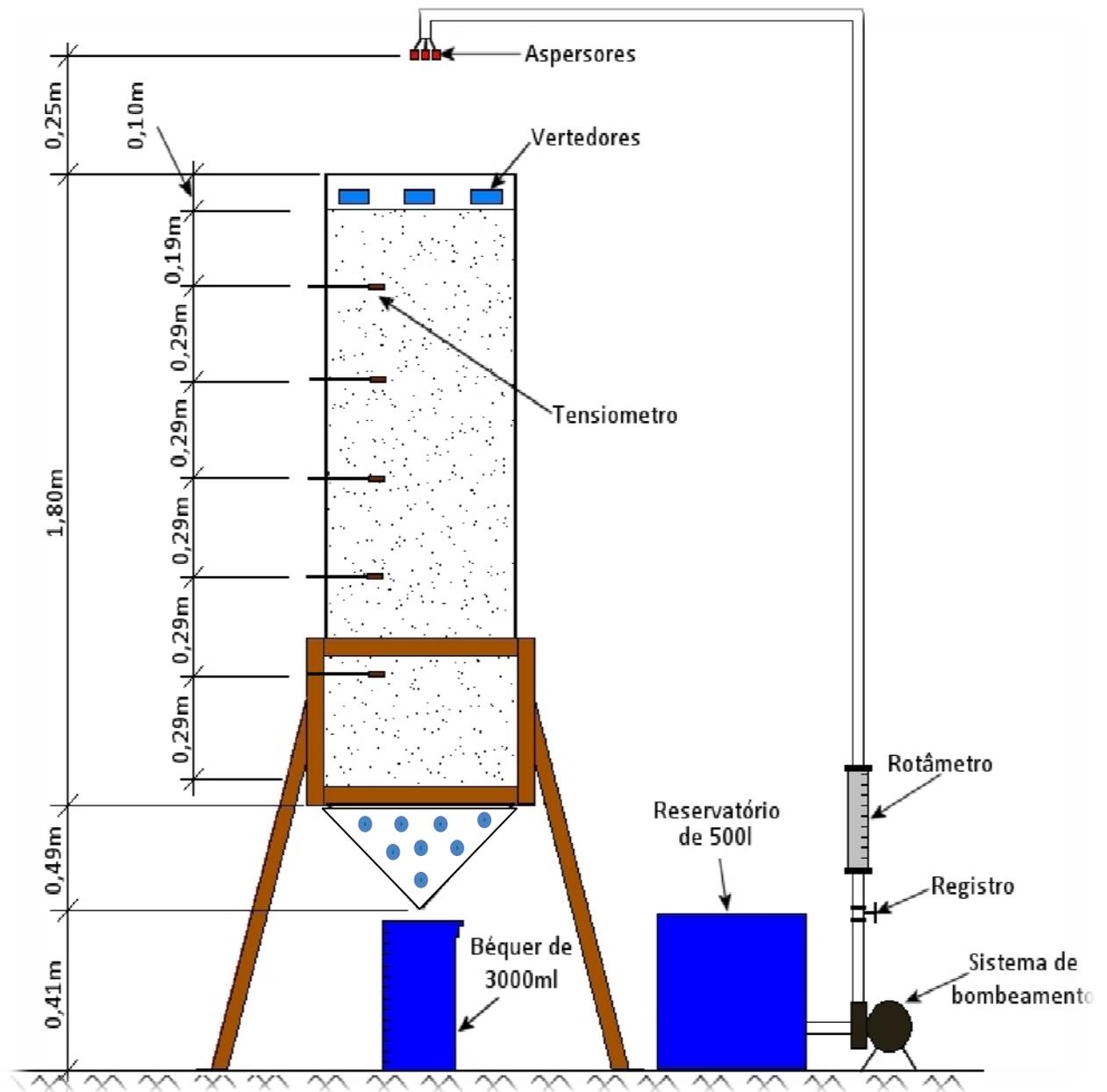


Figura 17-Projeto do Lisímetro



Figura 18-Lisímetro instalado em laboratório

4.6 Simulação da Precipitação

Foram realizadas 6 simulações de eventos chuvosos sintéticos por meio de irrigação por aspersores. Nos dias 15/05/2012 e 22/05/2012 foram realizadas as simulações apenas para a calibração dos equipamentos, as demais simulações foram denominadas Ensaio 1, 2, 3, e 4 realizadas dias 29/05/2012, 05/06/2012, 12/06/2012 e 19/06/2012, respectivamente. Foi definida a precipitação de 100 mm/h durante 20 minutos como uma chuva intensa com T_r (tempo de retorno) de 10 anos calculada utilizando a série histórica das precipitações máximas diárias da

Estação Meteorologia localizada nas coordenadas lat -23:2:0 e log -46:58:0, código: 2346003, operada FCTH/DAEE-SP, localizada em Vinhedo, São Paulo. Cada simulação de precipitação foi controlada pelo rotâmetro para uma vazão de 28 L/h o que corresponde à precipitação desejada levando em consideração a área do lisímetro de 0,2827m². A irrigação foi realizada com intervalos de 7 (sete) dias para obter independência da taxa de infiltração em relação aos eventos antecedentes, de acordo com o intervalo utilizado pelo Manual Nacional de Engenharia do Serviço de Conservação dos Recursos Naturais dos Estados Unidos (US-NRCS, 2004²). A chuva de 10 anos foi obtida pela formula de chuvas intensas generalizada de Uehara et al (1980).

A irrigação do lisímetro foi feita por meio de três microaspersores marca Agrojet, modelo MA-30 com capacidade de 27,2 l/h cada, a pressão de 200 kPa. O microaspersor possui a forma de cone e promove a formação de microgotículas. A precipitação produzida por microaspersores não reproduz o diâmetro de gotas e a velocidade de queda das pluviosidades naturais, mas apenas a taxa de precipitação ao longo do tempo. O rotâmetro é calibrado para a faixa de 10,0 a 60,0 l/h e possui registro de precisão. Conhecidas as intensidades de precipitação, a vazão correspondente é obtida em relação à área superficial do lisímetro e controlada de acordo com a sua distribuição no tempo. O volume drenado pelo fundo do lisímetro foi coletado por um Becker com capacidade de armazenamento de 3000 mL.

Considerando-se que, durante eventos de chuva, a evaporação é nula, o volume retido no lisímetro em determinado período de tempo é dado por

$$P \times A - Q - R = \Delta U \times Vol \quad (14)$$

Sendo:

A a área do topo do lisímetro [L²];

Vol o volume do lisímetro [L³];

P é a lâmina precipitada [L];

Q é o volume vertido do topo do lisímetro [L³];

R é o volume drenado para a recarga direta [L³];

ΔU é a variação de umidade no lisímetro [L³L⁻³]

Vol é o volume de água no lisímetro [L³].

² US-NRCS. Nacional Engineering Handbook. Part 630 – Hydrology (Disponível no URL <http://www.nrcs.usda.gov> – Technical References)

4.7 Retenção de água no solo

Para efetuar o ajuste dos resultados de umidade *versus* tensão mátrica (CRAS) fornecidos pela câmara de Richards foram utilizados o modelo de van Genuchten (1980) para os valores estimados de pressões de 1, 2, 5, 10, 30, 60 e 100 kPa no ensaio realizado na panela de baixa pressão e de 200, 300, 400, 600, 800, 1048 kPa no ensaio realizado na panela de alta pressão. A Equação 16 foi proposta por van Genuchten (1980) para representar a CRAS:

$$\theta = \theta_R + \frac{(\theta_s - \theta_R)}{[1 + (\alpha \cdot \psi)^n]^m} \quad (15)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (16)$$

em que θ é dado em $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e ψ em kPa, sendo que θ_R e θ_s indicam os valores de umidade residual e umidade na saturação, respectivamente, e α , m e n são parâmetros empíricos que devem ser estimados pelo ajuste dos dados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização do Solo

5.1.1 Análise granulométrica

De acordo com a análise granulométrica (Figuras 19 e 20), o teor de areia cai ao longo do perfil (Figura 19) apresentando um teor médio no perfil de 61,3%. O inverso acontece com os teores de silte e argila que aumentam em relação à profundidade, com valores médios de 13,5 e 25,2%.

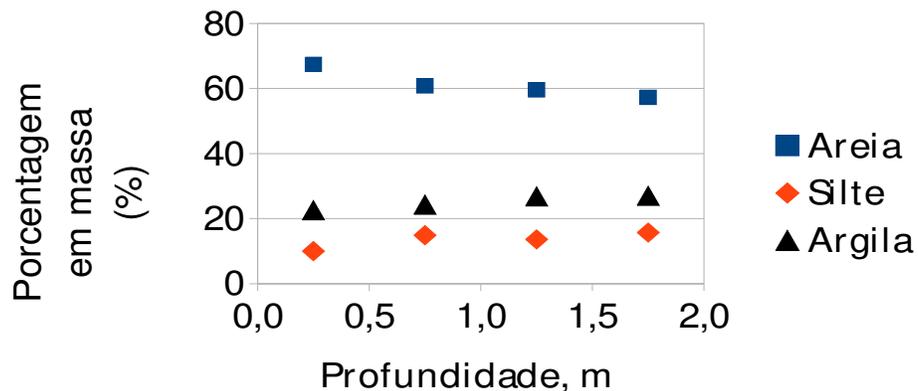
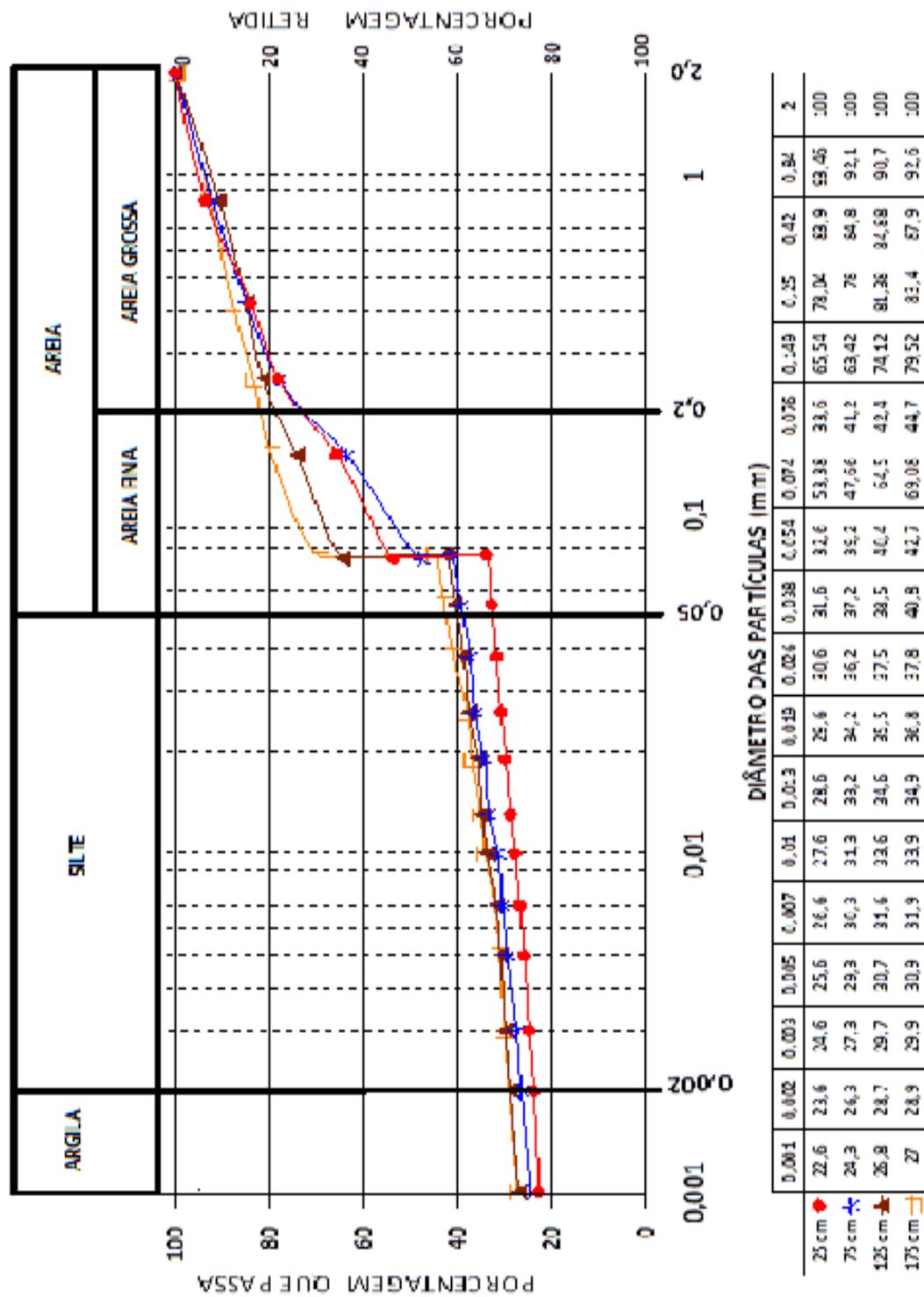


Figura 19-Composição granulométrica no perfil do solo

A análise granulométrica foi realizada com a utilização de defloculante, de acordo com a NBR-7181/1984, muitas partículas de argila que poderiam estar floculadas foram desagregadas para a realização do ensaio. Embora o teor de areia sofra redução com a profundidade, como pode ser observado na Figura 18, o teor de areia fina sobe de 72% na profundidade de 0,25 m para 82% na profundidade de 1,75m. Esses dados estão coerentes com a classificação do solo da região apresentados no tópico 4.1 como argissolo. Possivelmente, o solo sofreu translocação de argila para camadas mais profundas e/ou transporte de materiais com granulometria maior para as camadas superficiais.

CURVA GRANULOMETRICA CONJUNTA



CLASSE USDA - FRANCO ARGILO ARENOSO

Figura 20-Curva de granulometria conjunta

5.1.2 Curva de Retenção de Água no Solo (CRAS)

As diferenças de armazenamento de água no solo sob a mesma tensão mátrica demonstram a histerese que ocorre no armazenamento de água no solo. O monitoramento da tensão mátrica do solo, o conteúdo de água armazenado e o tamanho e distribuição dos poros do solo torna-se importante para a análise da sua influência.

Nas curvas de molhamento, observa-se um valor maior de entrada de ar nos macroporos da matriz do solo o que reduz o armazenamento de água no solo nas mesmas condições de tensão mátrica, temperatura e tipo de solo.

Nas Figuras 21 a 24, podem ser visualizadas as curvas de secamento e molhamento em relação à tensão mátrica do solo, nas profundidades de 0,5; 1,0 1,5 e 2,0m, respectivamente.

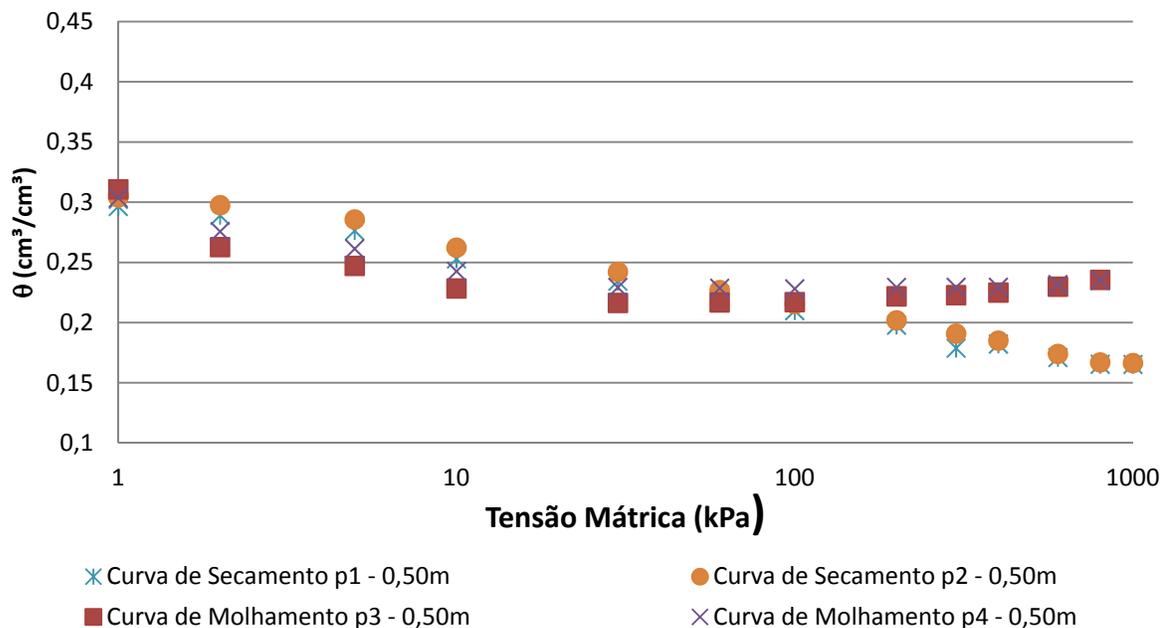


Figura 21 - C.R.A.S. monitorada nos Perfis de solo 1 e 2 por secamento e 3 e 4 por molhamento na profundidade de 0,5 m

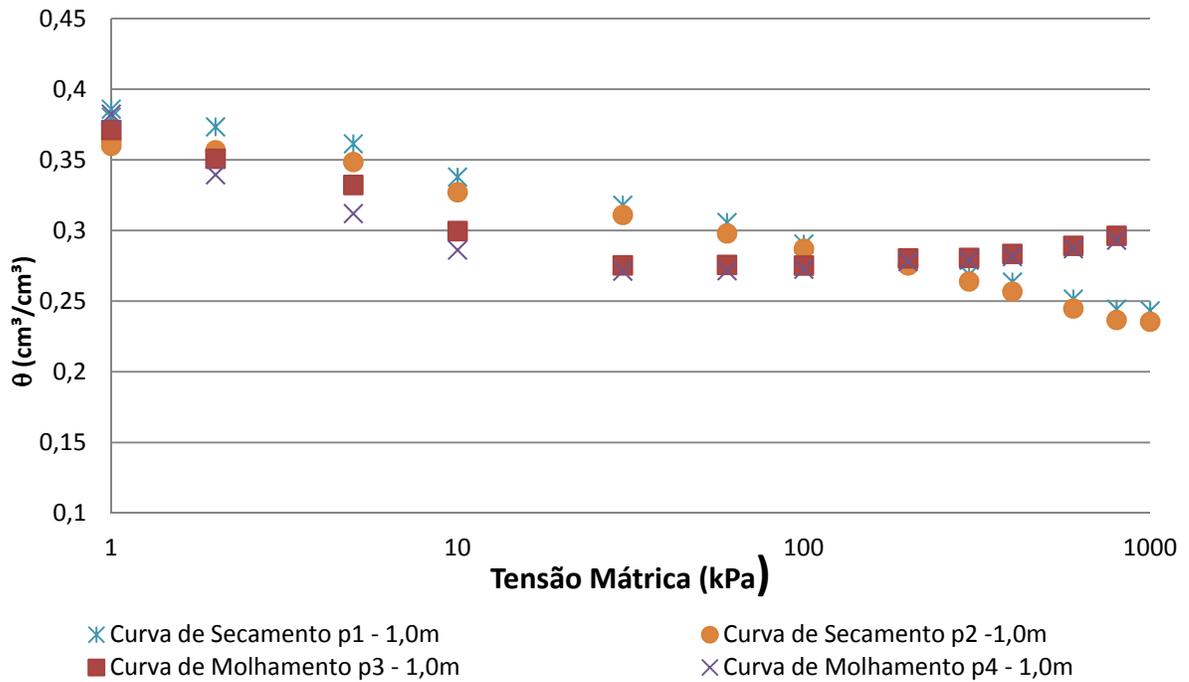


Figura 22 - C.R.A.S. monitorada nos Perfis de solo 1 e 2 por secamento e 3 e 4 por molhamento na profundidade de 1,0 m

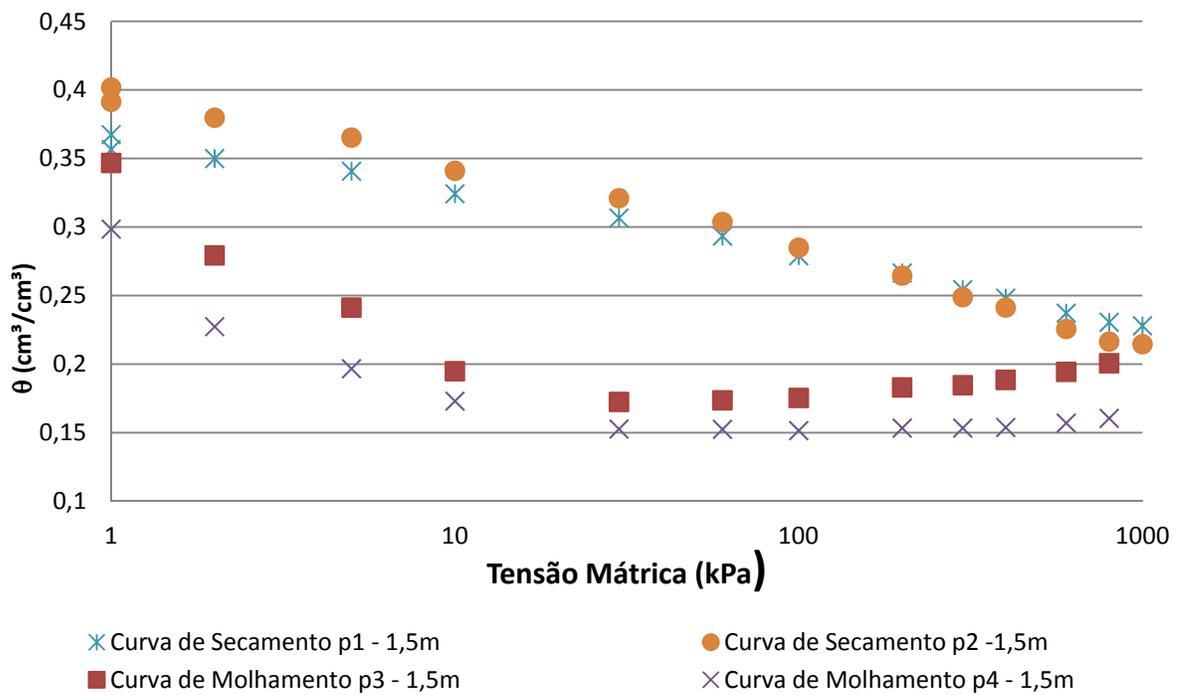


Figura 23 - C.R.A.S. monitorada nos Perfis de solo 1 e 2 por secamento e 3 e 4 por molhamento na profundidade de 1,5 m

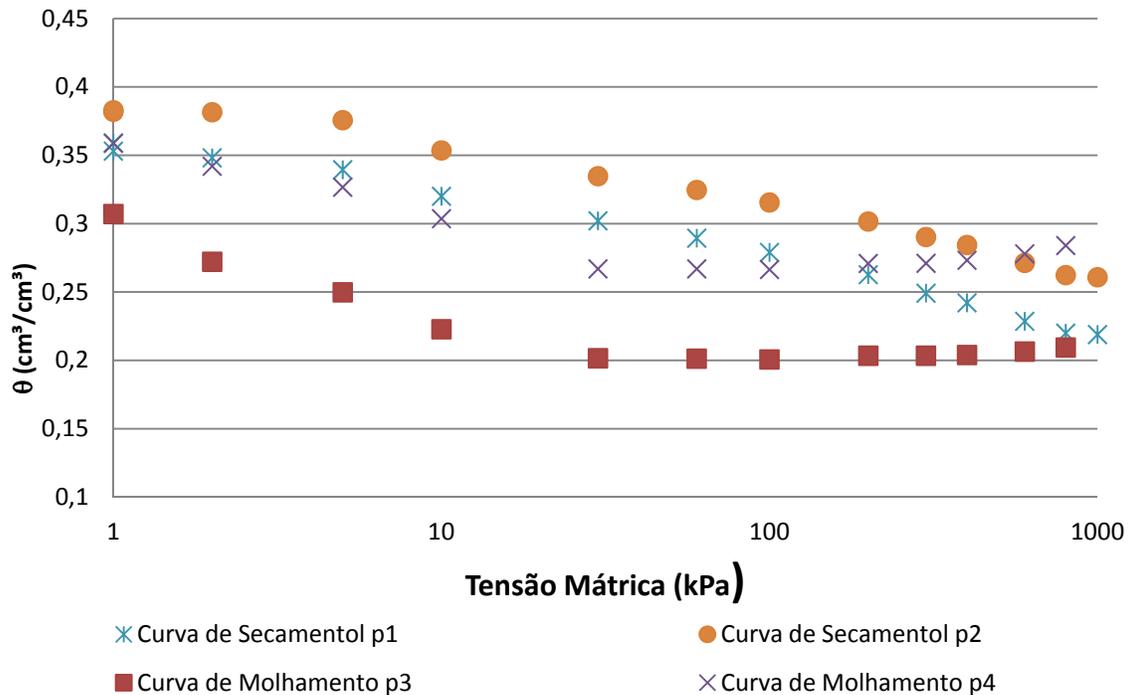


Figura 24 - C.R.A.S. monitorada nos Perfis de solo 1 e 2 por secamento e 3 e 4 por molhamento na profundidade de 2,0 m

O aumento no conteúdo volumétrico de água observados nas curvas de molhamento nas tensões acima de 100 kPa deve-se ao vazamento ocorrido na panela de alta pressão que submeteu as amostras à tensão inferiores às apontadas no leitor. A curva de molhamento é obtida com amostras secas e que são submetidas à tensão cada vez menores. Um tubo é interligado no interior da panela com água, à medida que reduz a tensão, as amostras entram em equilíbrio com a tensão e umidecem. O trabalho realizado para o umidecimento é maior que o trabalho de secamento.

Pela análise das Figuras 21 e 22, pode-se observar que o solo nas profundidades de 0,5 e 1,0 m, respectivamente, possuem dois comportamentos distintos: um comportamento no intervalo de tensão de 1 a 100 kPa, em que a macroporosidade exerce maior influência na retenção de água no solo e outro comportamento com tensões de 100 a 1000 kPa, em que a microporosidade exerce influência na retenção de água.

As CRAS de secamento (Perfis 1 e 2) e de molhamento (Perfis 3 e 4) nas profundidades de 0,5; 1,0 e 1,5 m são correspondentes mesmo sendo de perfis diferentes. Já na profundidade de 2,0 as CRAS são divergentes, o que leva a concluir que o material na

profundidade de 2,0 m é heterogêneo e não podem ser utilizados dados de um perfil para simular outro perfil nesta profundidade.

As C.R.A.S. obtidas por secamento monitoradas foram utilizadas para o cálculo dos parâmetros de van Genuchten (1980), de acordo com a Equação 15. Os ajustes obtidos estão representadas nas Figuras 25 a 28. Os parâmetros de calibração θ_R e θ_s indicam os valores de umidade residual e umidade na saturação, respectivamente, e α , m e n são parâmetros empíricos estimados pelo ajuste dos dados e o E^2 que representa o erro quadrático podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1-Parâmetros utilizados na calibração das equações de van Genuchten para a Curva de Secagem

Prof. (m)	<i>Perfil 1</i>				<i>Perfil 2</i>			
	0,50	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0
	Parâmetros							
α	0,24	0,38	0,38	0,20	0,26	0,24	0,13	0,13
n	1,11	1,08	1,08	1,08	1,11	1,08	1,12	1,08
θ_s	0,30	0,39	0,37	0,35	0,31	0,37	0,39	0,39
θ_R	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
E^2	3,1E-	8,9E-5	1,8E-4	7,2E-4	8,6E-5	0,051	4,3E-5	2,4E-4

Os valores de umidade de saturação variam de 0,30 a 0,39 cm^3/cm^3 , em profundidade e entre os perfis, os valores de umidade residual encontrados foram de 0,01 cm^3/cm^3 para todos os perfis e profundidades.

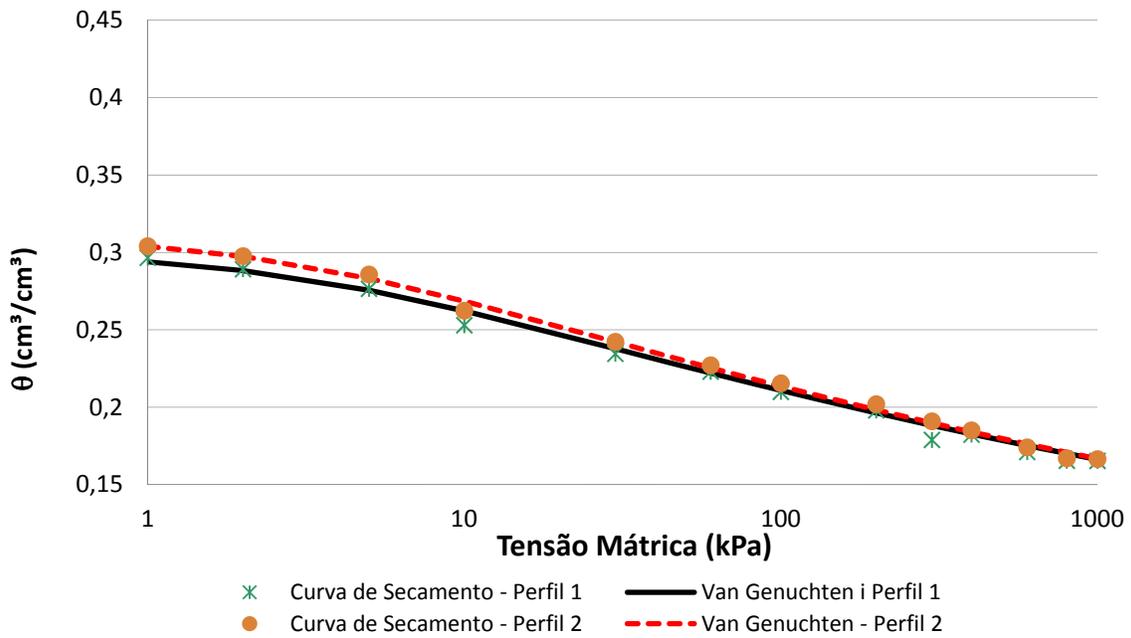


Figura 25-C.R.A.S. monitorada e calculada pelas equações desenvolvidas por van Genuchten nos Perfis de solo 1 e 2 por secamento na profundidade de 0,5 m

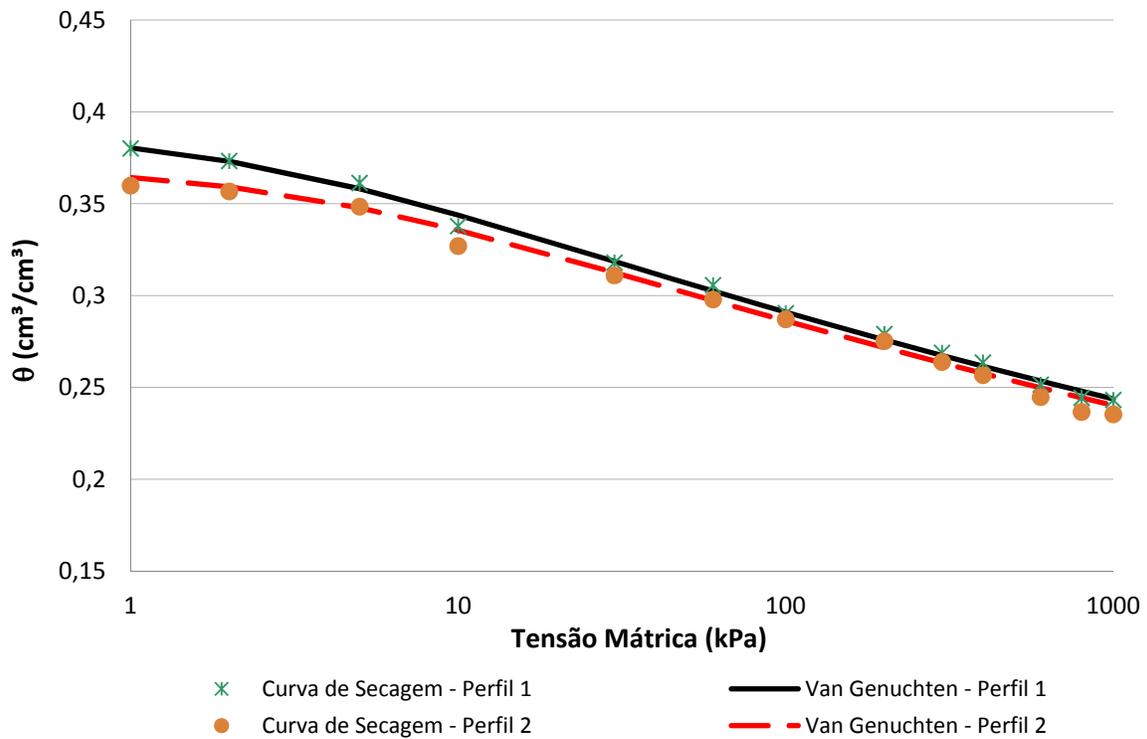


Figura 26-C.R.A.S. monitorada e calculada pelas equações desenvolvidas por van Genuchten nos Perfis de solo 1 e 2 por secamento na profundidade de 1,0 m

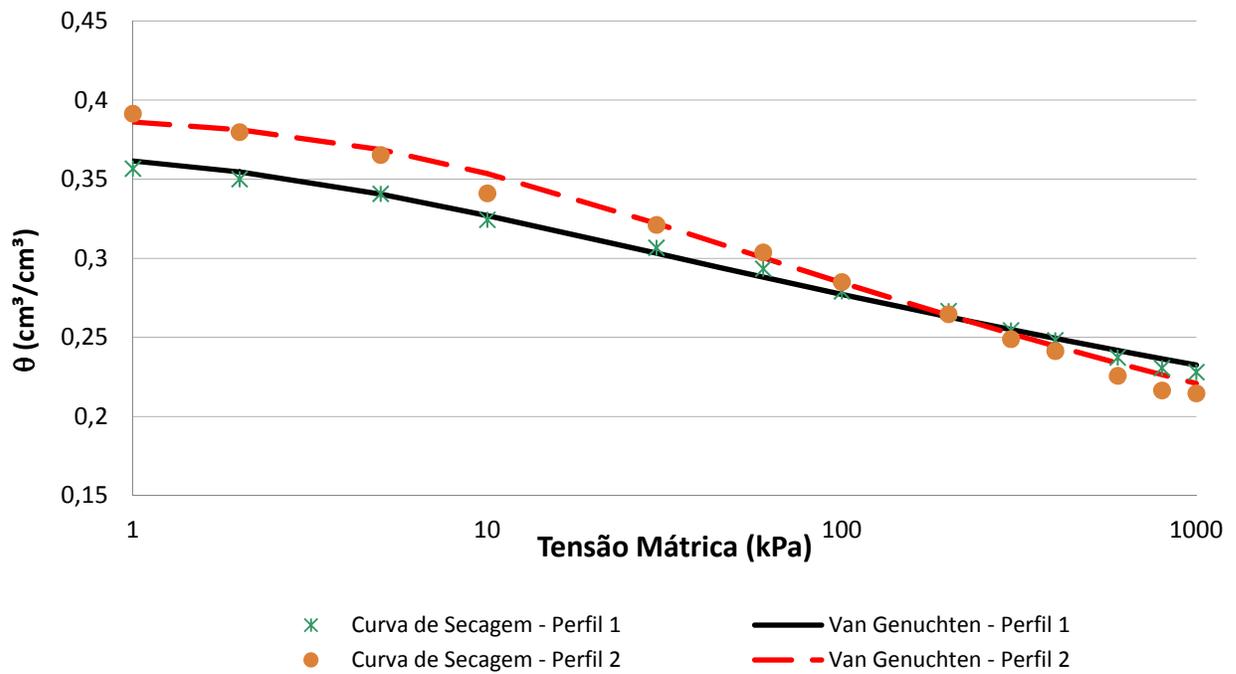


Figura 27- C.R.A.S. monitorada e calculada pelas equações desenvolvidas por van Genuchten nos Perfis de solo 1 e 2 por secamento na profundidade de 1,5 m

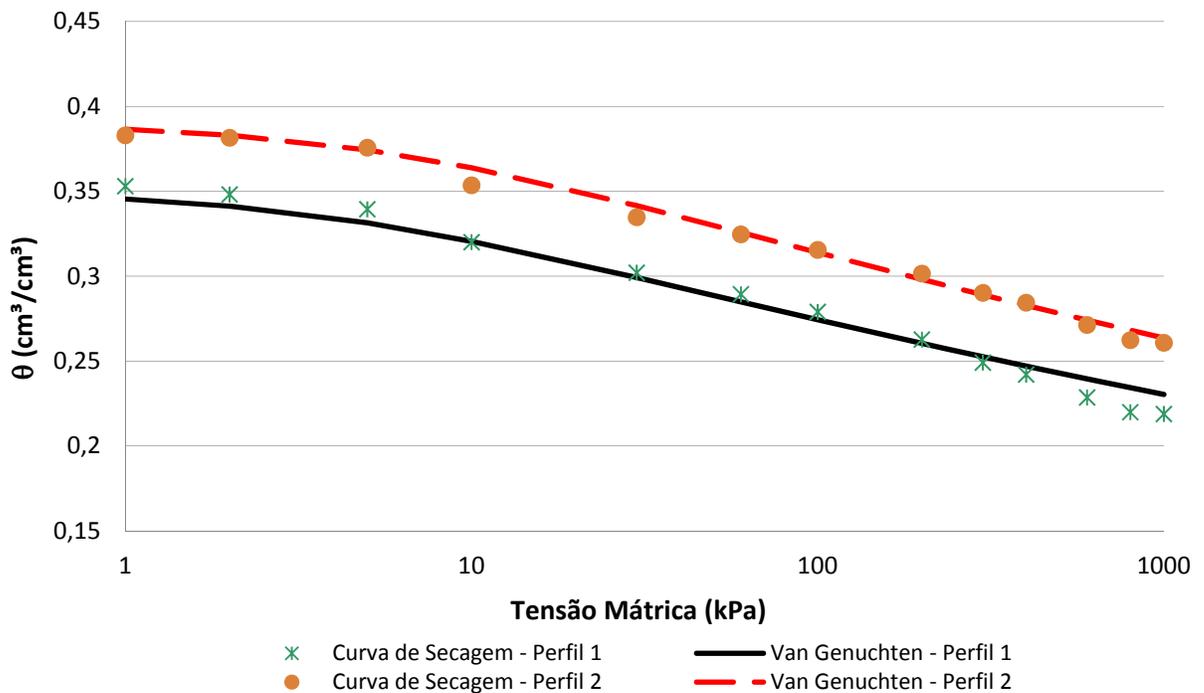


Figura 28- C.R.A.S. monitorada e calculada pelas equações desenvolvidas por van Genuchten nos Perfis de solo 1 e 2 por secamento na profundidade de 2,0 m

Observa-se que as C.R.A.S. obtidas por secamento calculadas pelas equações desenvolvidas por van Genuchten (1980) representadas nos perfis apresentados anteriormente representam de forma satisfatória (E^2 máximo igual a 0,051) o conteúdo volumétrico de água no solo em todas as profundidades monitoradas.

5.1.3 Porosidade (intrusão de Mercúrio)

A porosidade do solo foi analisada por ensaios de intrusão de mercúrio. Os resultados apresentados, nas Figuras 29 a 32 mostram a quantidade total de mercúrio introduzido em apenas de 1 dos 4 perfis e as Figuras 33 a 36 correspondem à desacumulação do mercúrio introduzido e a sua distribuição de acordo com o diâmetro dos poros para diferentes profundidades (0,25; 0,75; 1,25 e 1,75m).

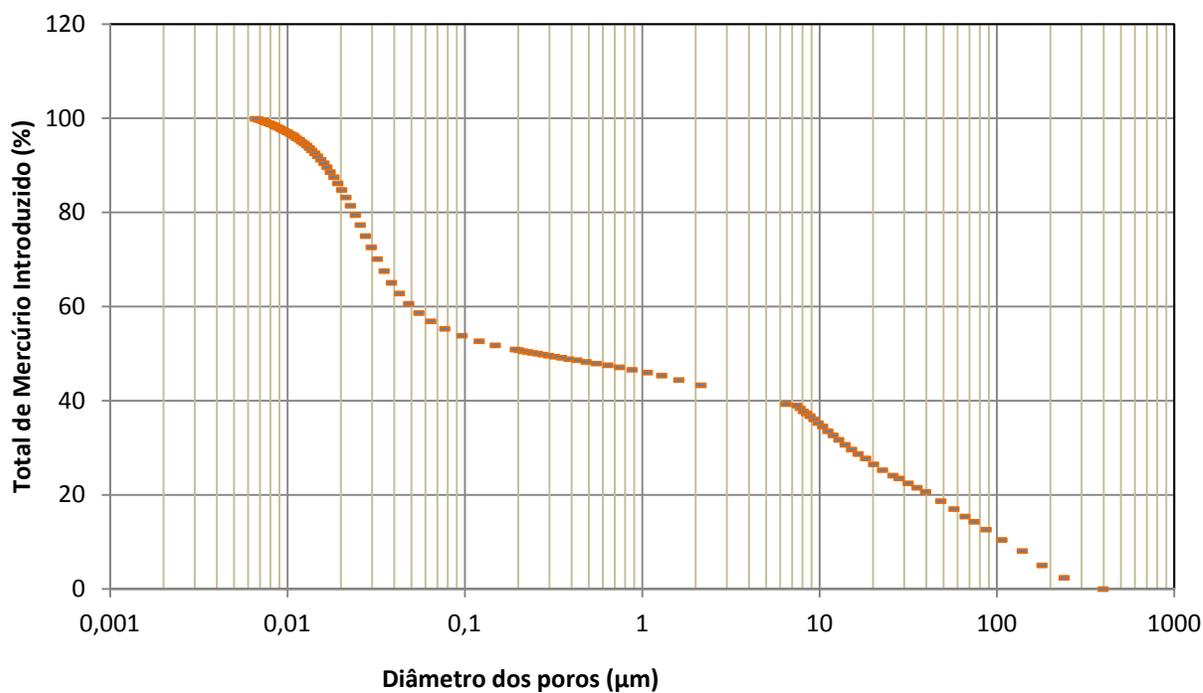


Figura 29-Total de Mercúrio introduzido em relação ao diâmetro dos poros no perfil 1 na profundidade de 0,25m.

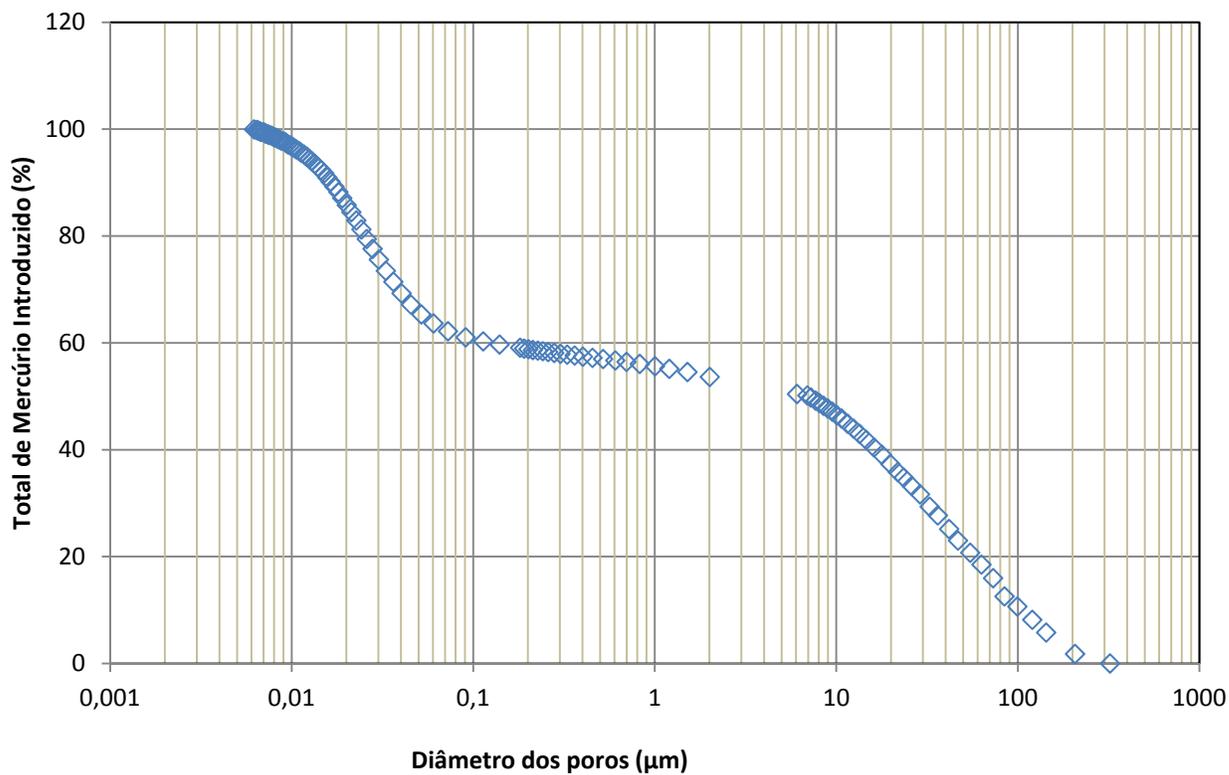


Figura 30-Total de Mercúrio introduzido em relação ao diâmetro dos poros no perfil 1 na profundidade de 0,75m

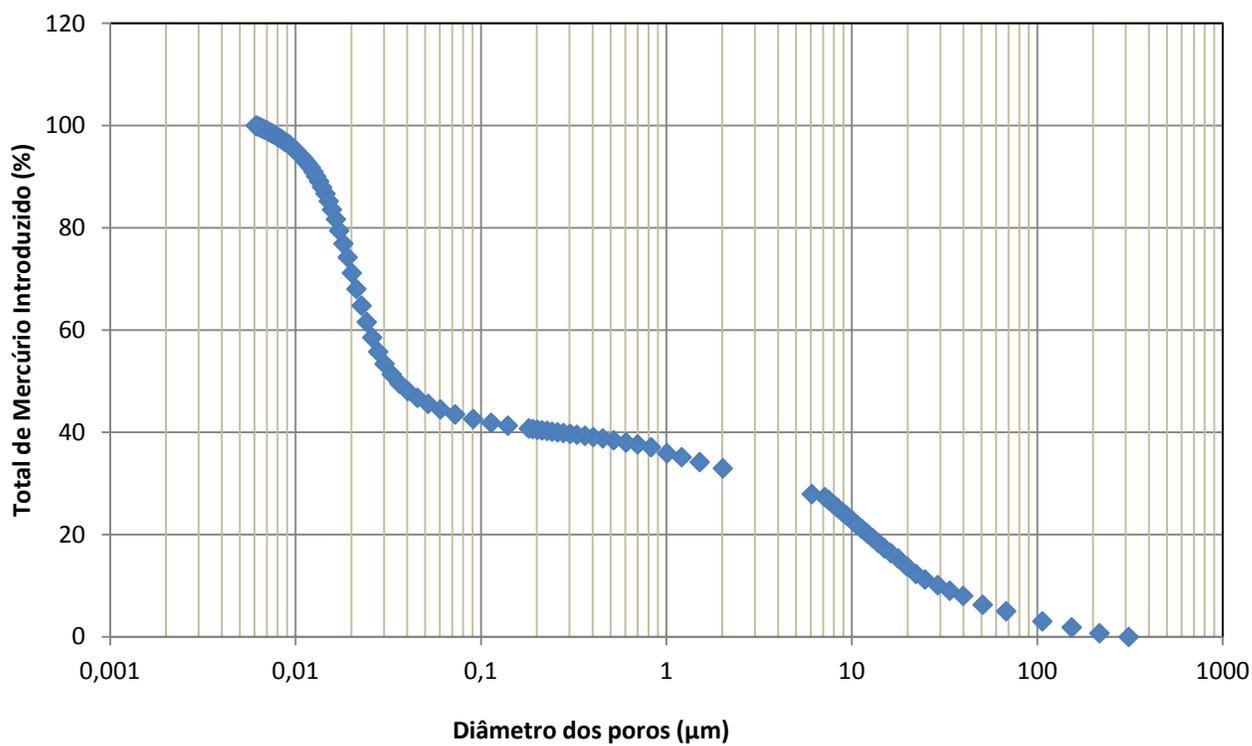


Figura 31-Total de Mercúrio introduzido em relação ao diâmetro dos poros no perfil 1 na profundidade de 1,25m

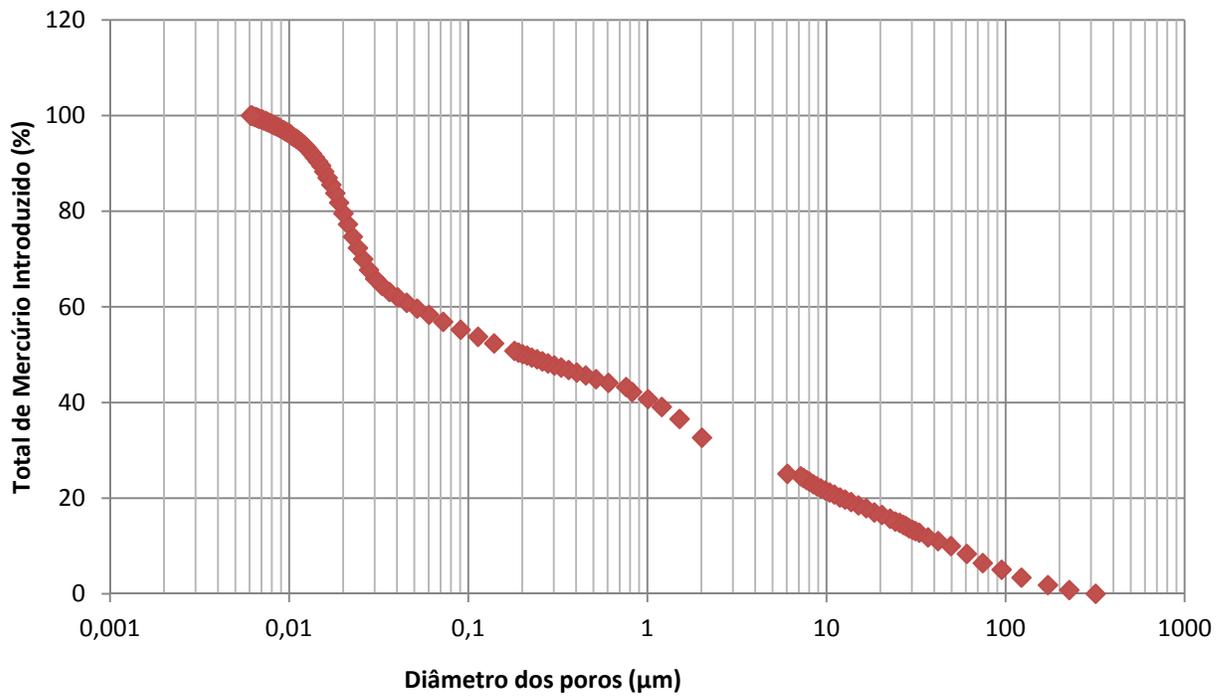


Figura 32-Total de Mercúrio introduzido em relação ao diâmetro dos poros no perfil 1 na profundidade de 1,75m

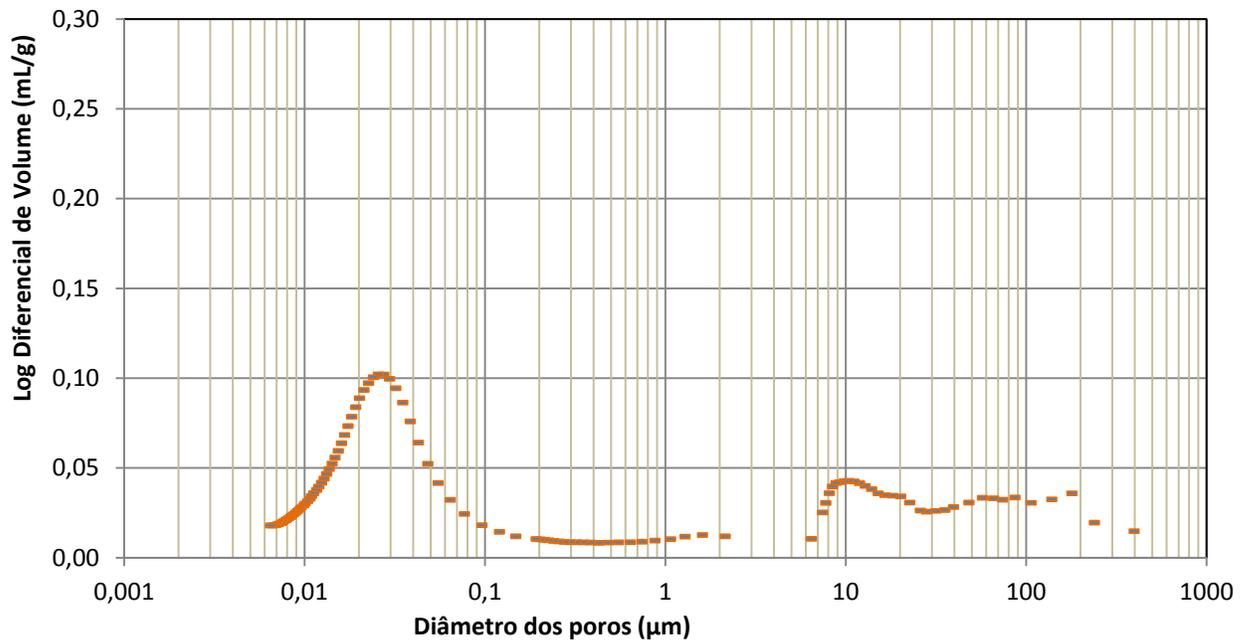


Figura 33-Distribuição de Mercúrio introduzido em relação ao diâmetro dos poros no perfil 1 na profundidade de 0,25m.

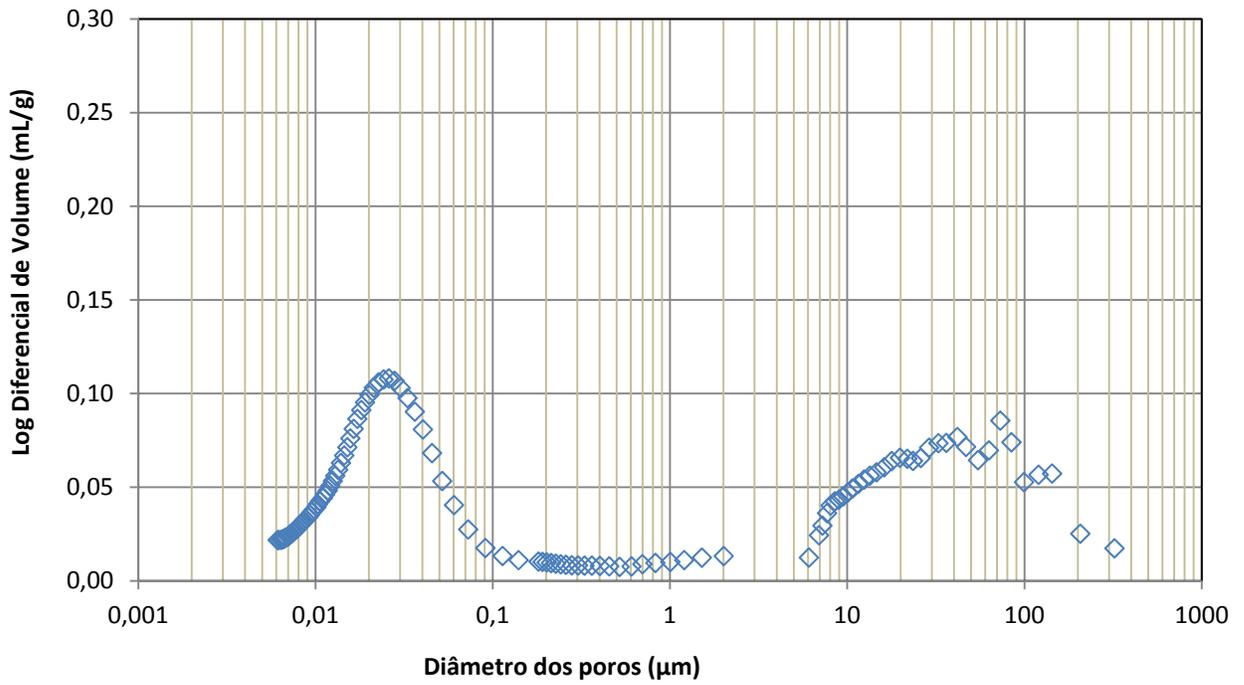


Figura 34-Distribuição de Mercúrio introduzido em relação ao diâmetro dos poros no perfil 1 na profundidade de 0,75m

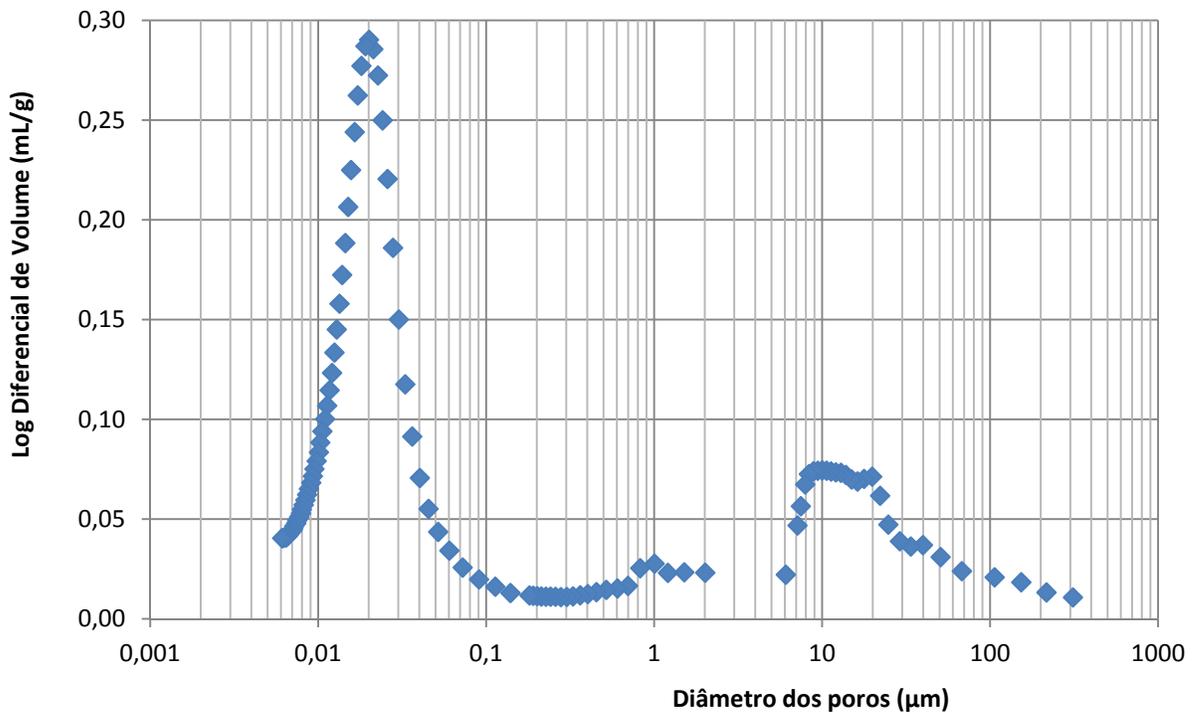


Figura 35 - Distribuição de Mercúrio introduzido em relação ao diâmetro dos poros no Perfil 1 na profundidade de 1,25m

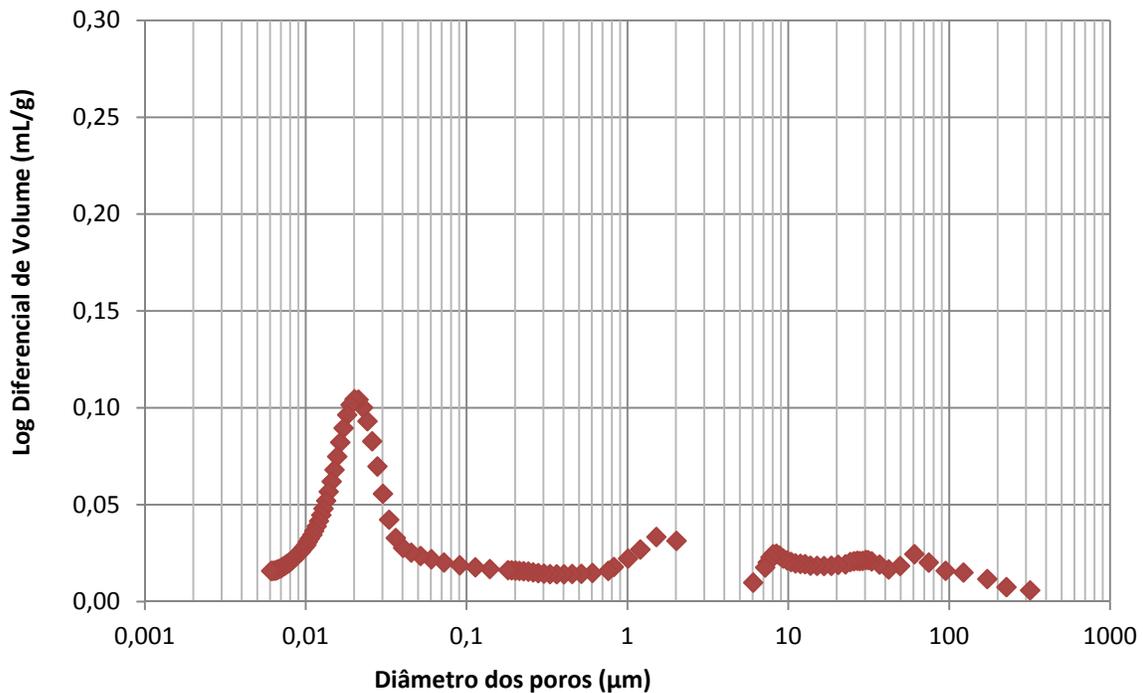


Figura 36 - Distribuição do Mercúrio introduzido em relação ao diâmetro dos poros no perfil 1 na profundidade 1,75 m

Nos locais em que há um aumento significativo no percentual de mercúrio introduzido (Figuras 29 a 32), observado pela elevação rápida da curva, caracterizam-se pontos nos quais há entrada de ar.

Pelas Figuras 33, 35 e 36, pode-se inferir que nas profundidades de 0,25; 1,25 e 1,75m há predominância de microporos no solo em relação aos macroporos, caracterizado pela maior distribuição de mercúrio introduzido nestes. Esse fato não é observado na profundidade de 0,75m (Figura 34) em que as distribuições de macro e microporos estão em equilíbrio.

As porosidades médias de todas as amostras de acordo com as suas profundidades é apresentada também na Figura 37. Pode-se observar que a porosidade média aumenta na profundidade de 1,25 m.

A variação dos valores de porosidade encontrados na profundidade de 1,0 a 1,5m foi provocada pela presença de fragmentos de rocha, conforme observado na escavação descrita na metodologia a partir de 0,8m.

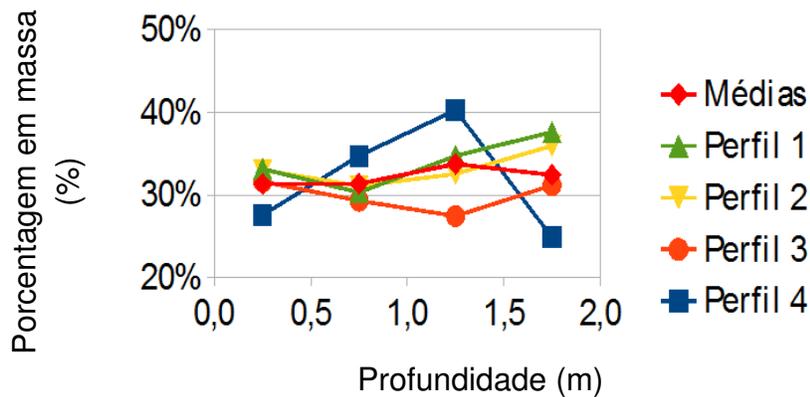


Figura 37-Porosidade no perfil de solo

Um material com grande variação no tamanho dos poros apresenta uma redução gradual no teor de umidade com o aumento da sucção.

5.1.4 Densidade dos Sólidos

A densidade dos sólidos teve uma variação de aproximadamente 2,6 g/cm³ a 2,8 g/cm³ (Figura 38) ao longo do perfil do solo. O aumento de densidade ao longo do perfil demonstra que a taxa de variação do empuxo cresce no terreno a uma taxa variável e crescente, que favorece a resistência do solo por atrito.

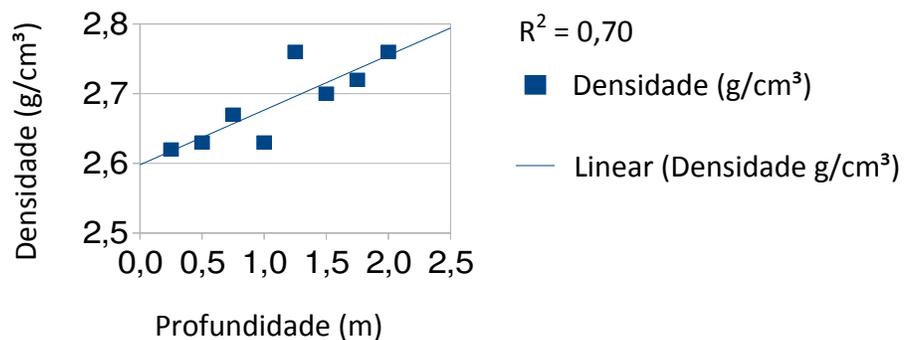


Figura 38-Densidade dos sólidos ao longo do perfil do solo

Comparando os resultados de porosidade encontrados na Figura 37 e de densidade dos sólidos (Figura 38), podemos verificar que ambos aumentam com a profundidade. Esse fato pode

ser explicado pelos vários fragmentos de rocha encontrados abaixo de 0,8 m de profundidade no momento da escavação que fazem com que a porosidade do solo aumente. Quanto à densidade dos sólidos, ela está relacionada à partícula, ao grau de intemperismo sofrido pelo material e não ao solo. Quanto mais próximo da superfície maior é a ação do intemperismo, justificando a densidade dos sólidos menor nesta região e seu aumento de acordo com o aumento da profundidade.

5.1.5 Densidade aparente seca

Na Figura 39, podem ser visualizados os valores de densidade aparente seca do solo das amostras dos Perfis 1, 2, 3 e 4, obtidos de acordo com a Equação 3. Na profundidade compreendida entre 1,0 a 1,5 m, observa-se a maior variação espacial da densidade aparente seca do solo no local, conforme também observado nas distribuições de porosidade (Figura 37). Esse fato, assim como observado nas porosidades, deve-se à presença de fragmentos de rocha, uma vez que a porosidade aumenta, consequentemente, a densidade aparente seca reduz. Observa-se que os maiores valores de densidade aparente seca e menores valores de porosidade encontram-se na superfície.

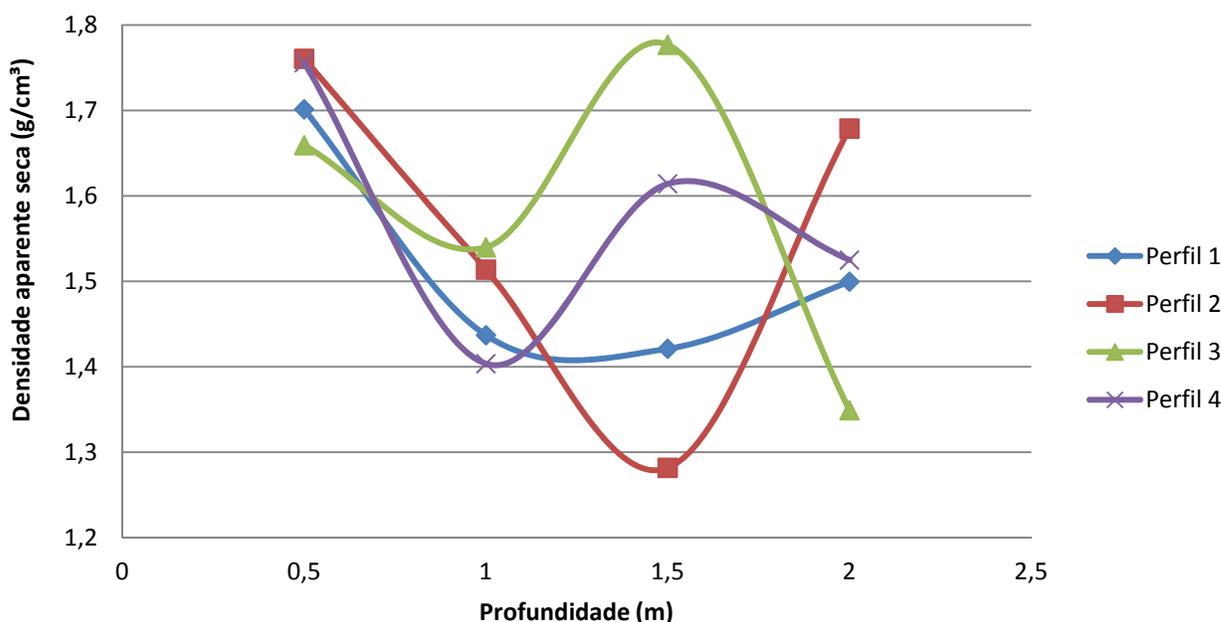


Figura 39-Perfis de densidade aparente seca do solo

5.2 Simulação de precipitação e monitoramento manométrico

Foram realizadas 4 simulações de precipitação no lisímetro correspondente a uma chuva máxima média local de 100mm/h durante 20 minutos (seção 4.6) em que foram monitoradas as tensões antecedentes no solo do lisímetro.

Os resultados das tensões antecedentes aos ensaios de precipitação do lisímetro são apresentados nas Figuras 40, 41, 43, 45 e 47.

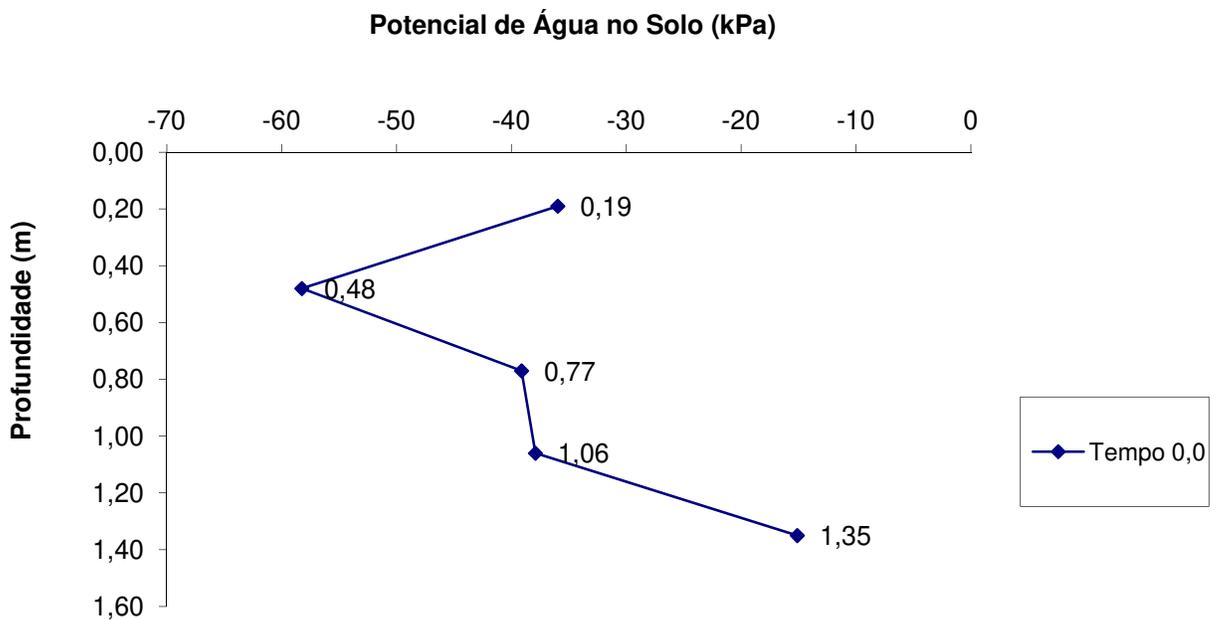


Figura 40-Perfil inicial de tensões observadas no lisímetro dia 15/05/2012

Observaram-se tensões mátricas altas (entre 15 a 58 kPa) no dia 15/05/2012 pois a amostra permaneceu, desde o dia 01/03/2012 até 15/05/2012, 75 dias, sem adição de água no lisímetro. Foram simuladas duas precipitações, uma dia 15/05/2012 e outra dia 22/05/2012 ambas com 100mm/h por 20 minutos sem monitoramento para umedecimento do solo e intervalo de 7 dias. Nos demais monitoramentos, observa-se que as condições de umidade iniciais estão muito próximas, com tensões entre 0,2 a 4 kPa. As precipitações dos dias 15/05/2012 e 22/05/2012 não foram monitoradas pois os instrumentos estavam sendo calibrados.

Nas Figuras 42, 44, 46 e 48, pode ser visualizada a evolução do Potencial de água no solo ao longo do perfil do solo do lisímetro monitoradas pelos tensiômetros nos ensaios 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Para cada ensaio foram monitoradas tensões nas profundidades de 0,19; 0,48; 0,77; 1,06 e 1,35. Foi utilizado outro ponto de monitoramento correspondente a 0,481 m que representa um segundo tensiômetro da profundidade de 0,48 m, com a finalidade de verificar uniformidade da frente de umidecimento.

Devido à saturação do solo foram observadas cargas manométricas positivas ao longo do tempo que aumentam com a profundidade. A análise da variação das tensões ao longo dos perfis mostra claramente a evolução da frente de molhamento do solo dentro do lisímetro.

A capacidade de armazenamento de dados foi ultrapassada no ensaio 1 pois os dados foram coletados a cada segundo. Na Figura 42 pode ser observado o prolongamento dos pontos onde não houve armazenamento de dados. No ensaio 2 foi corrigido tempo de coleta de dados para cada minuto o que possibilitou o armazenamento de todos os dados do ensaio.

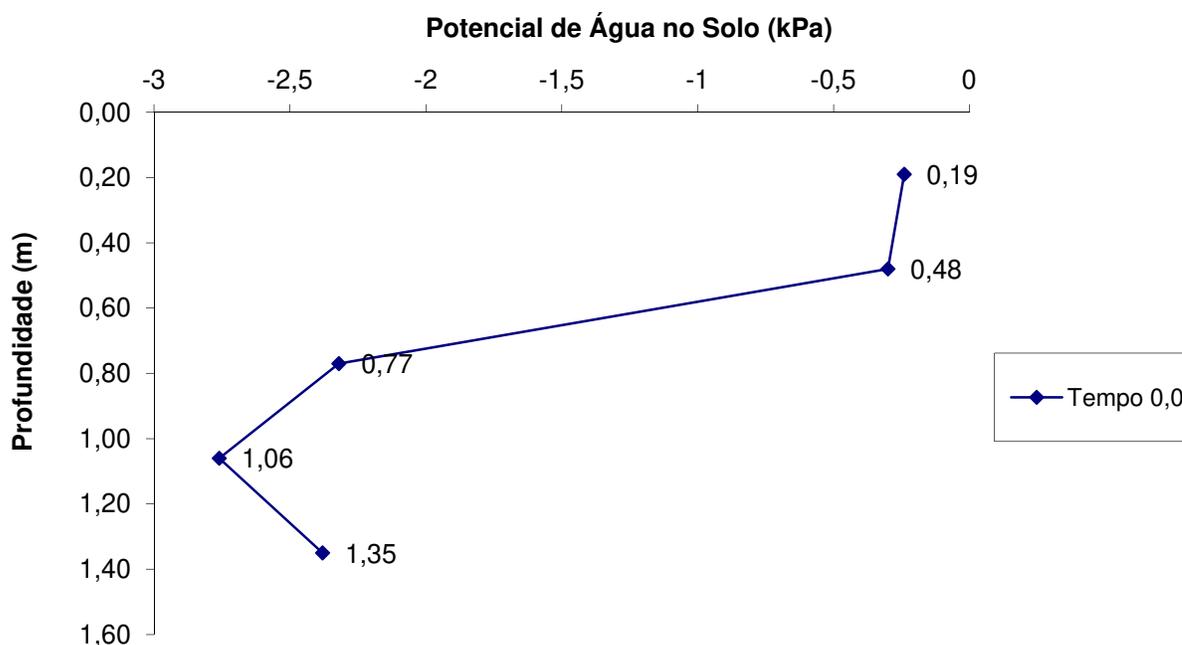


Figura 41-Perfil inicial de tensões observadas no lisímetro dia 29-05-2012

Monitoramento do Lisímetro - Ensaio 1

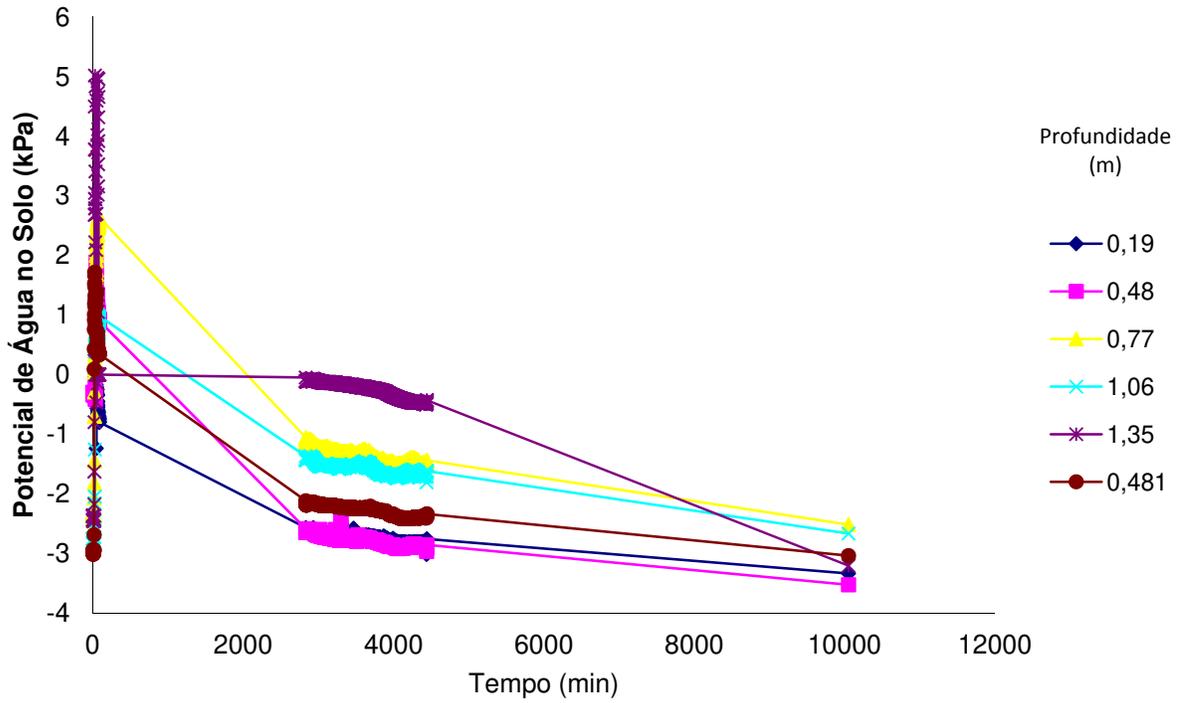


Figura 42-Evolução do Potencial de água no solo ao longo do perfil do solo do lisímetro durante o Ensaio 1 realizado dia 29-05-2012

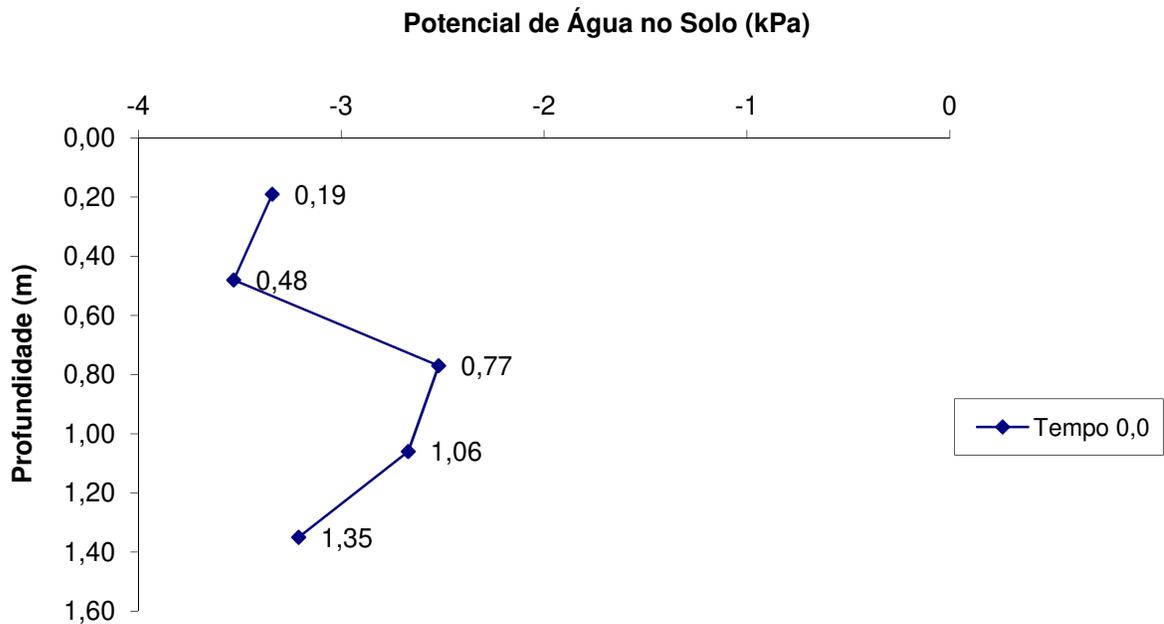


Figura 43-Perfil inicial de tensões observadas no lisímetro dia 05-06-2012

Monitoramento do Lisímetro - Ensaio 2

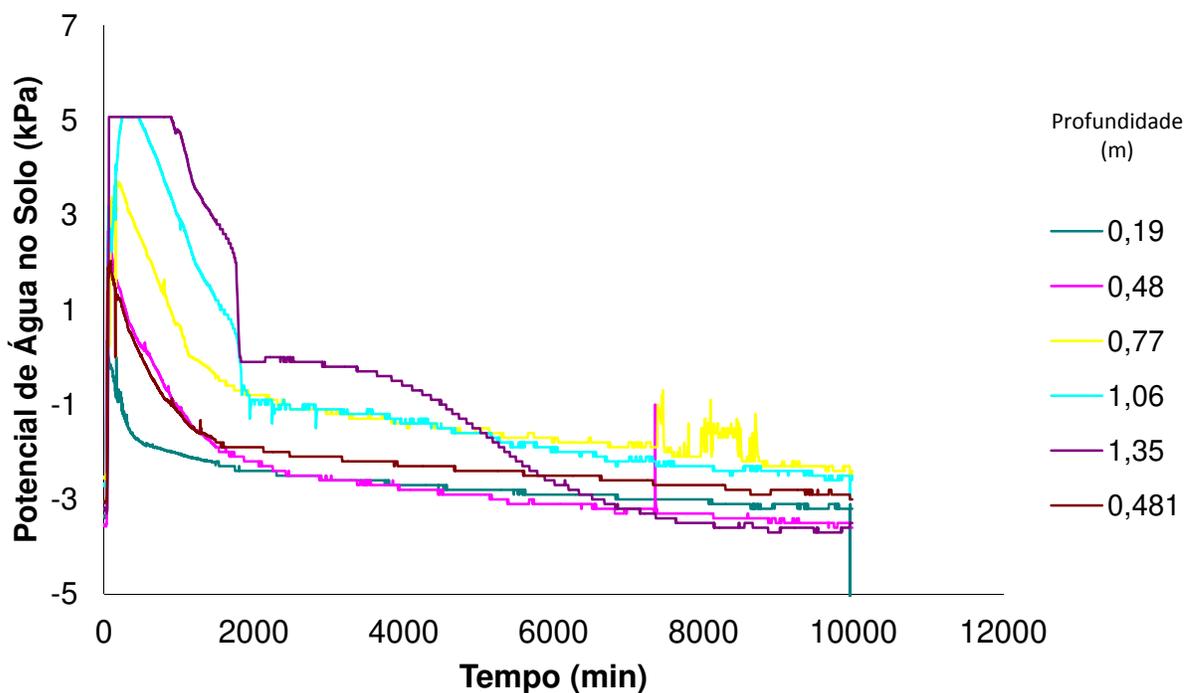


Figura 44- Evolução do Potencial de água no solo ao longo do perfil do solo do lisímetro durante o Ensaio 2 realizado dia 05-06-2012

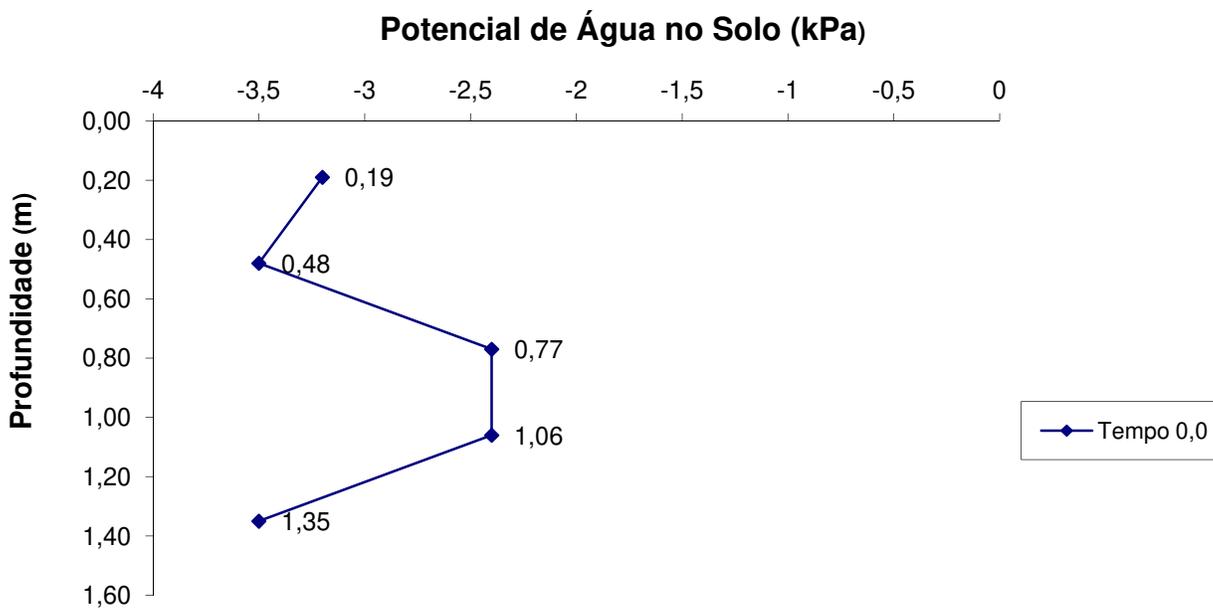


Figura 45-Perfil inicial do Potencial de água no solo observadas no lisímetro dia 12-06-2012

Monitoramento do Lisímetro - Ensaio 3

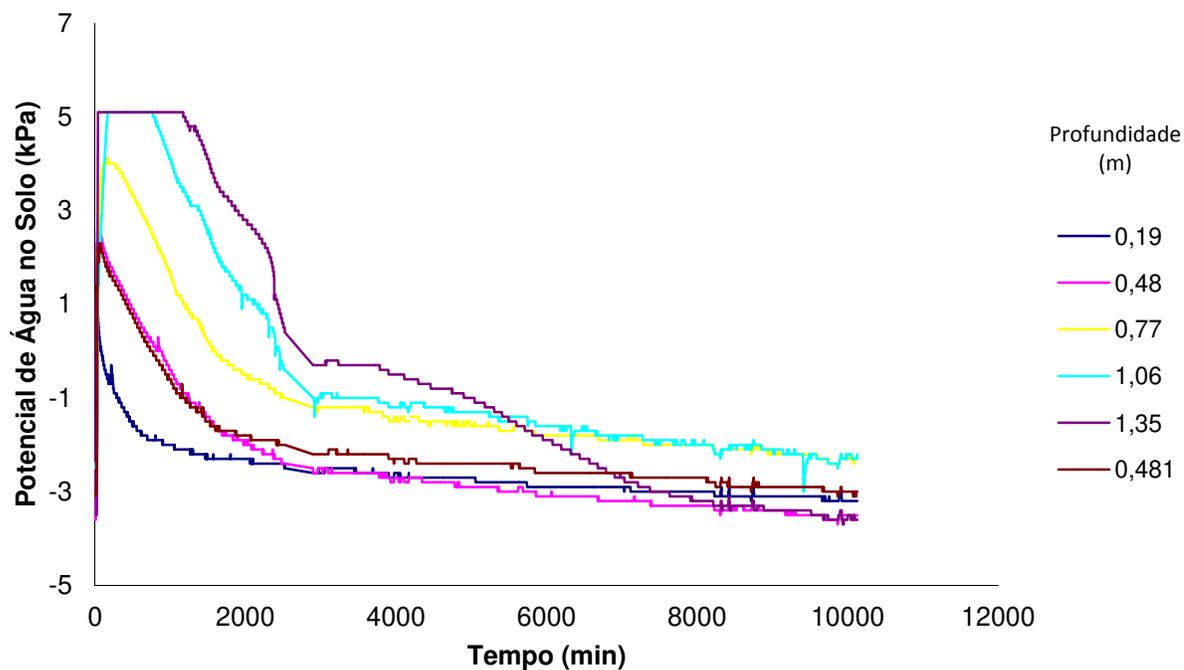


Figura 46 - Evolução do Potencial de água no solo ao longo do perfil do solo do lisímetro durante o Ensaio 3 realizado dia 12-06-2012

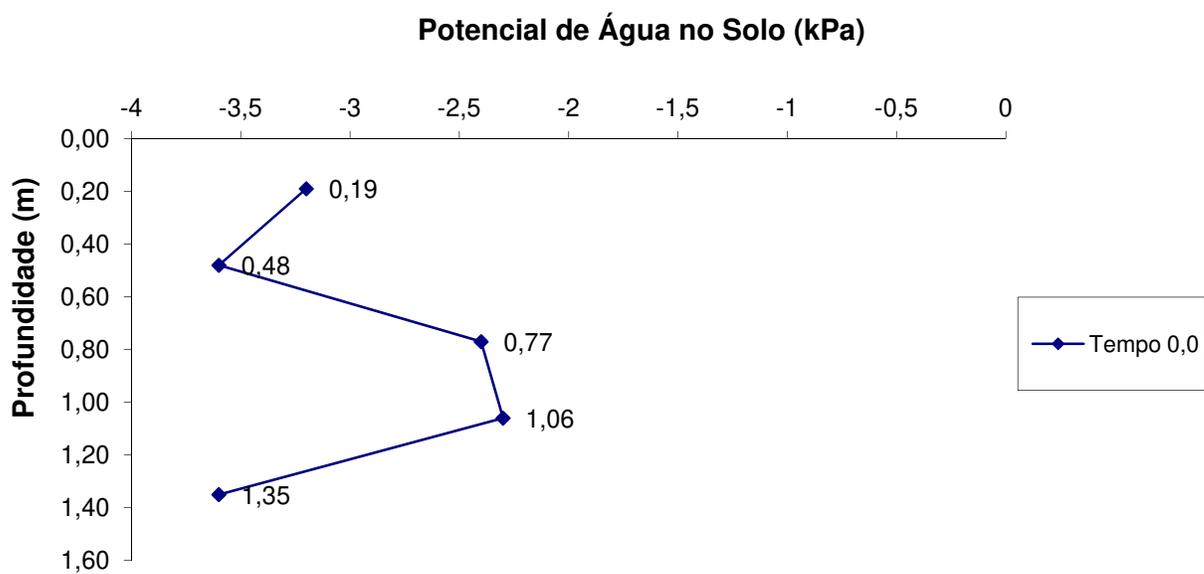


Figura 47-Perfil inicial de tensões observadas no lisímetro dia 19-06-2012

Monitoramento do Lisímetro - Ensaio 4

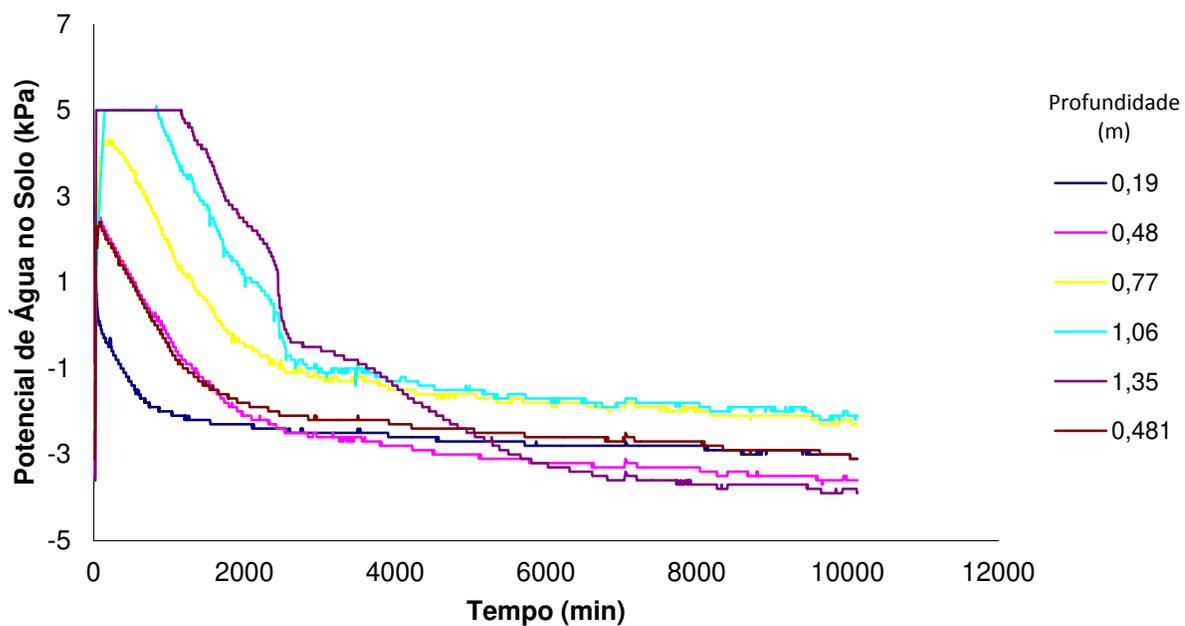


Figura 48 - Evolução do Potencial de água no solo ao longo do perfil do solo do lisímetro durante o Ensaio 4 realizado dia 19-06-2012

Monitoramento do Lisímetro - Ensaio 4 (70 dias)

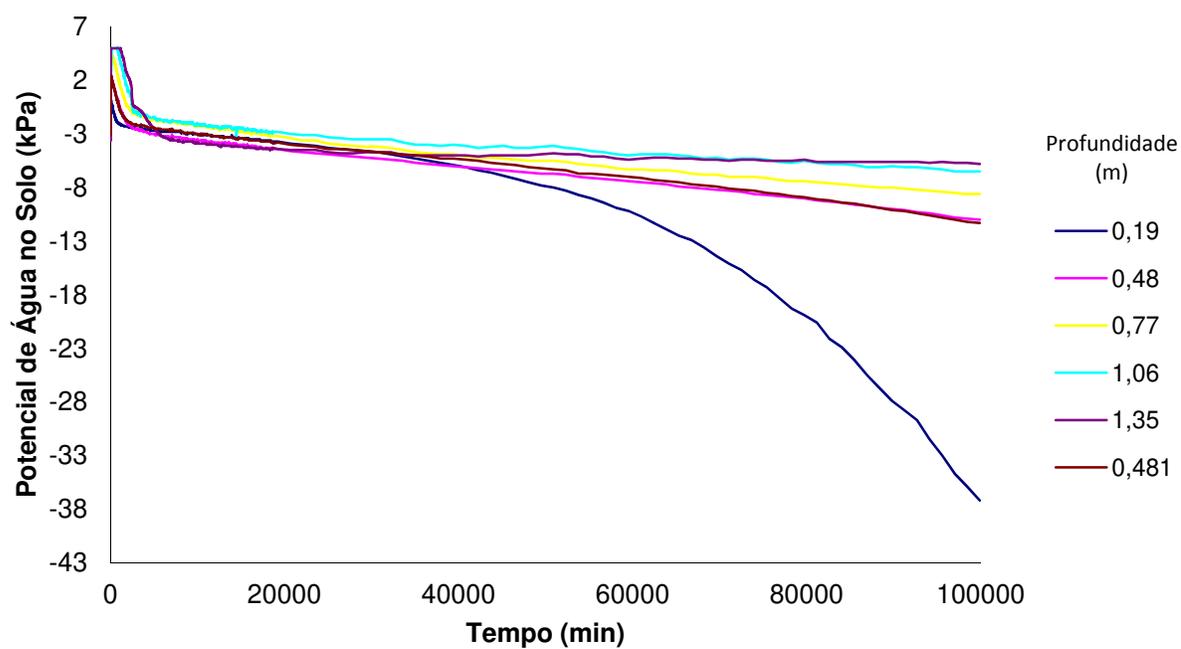


Figura 49 - Evolução das Tensões ao longo do perfil do solo do lisímetro durante o Ensaio 4 realizado dia 19-06-2012 por 70 dias.

Pode-se observar que os valores de tensão mátrica nos ensaios 1, 2, 3 e 4 atingiram valores próximos ao equilíbrio após um intervalo de uma semana. Houve um decréscimo acentuado nos primeiros 2800 minutos (48 horas). Após esse período, as tensões mátricas aumentaram e com 7 dias de encontram-se entre 0,2 e 4 kPa.

Pode-se verificar que a carga manométrica máxima encontrada no solo foi de 5 kPa (0,5 mca) em profundidades superiores à 0,77m devido a restrições de leitura do equipamento a valores superiores. Valores de carga manométrica positivos inferiores ao limite de leitura do equipamento foram encontrados à profundidade de 0,77m.

Na Figura 49, observa-se que na profundidade de 0,19 m houve uma significativa redução na tensão mátrica, fato relacionado a evapotranspiração ocorrida na superfície do lisímetro pois não foi realizada nova simulação de precipitação em um período de 70 dias.

5.3 Balanço Hídrico do Lisímetro

Para realizar o balanço hídrico do lisímetro, foi utilizada a Equação 14. A precipitação simulada pelos microaspersores para uma vazão de 28L/h durante 20 minutos, equivalente a uma precipitação de 100 mm/h. Não houve volume vertido no topo, o volume percolado (R) foi monitorado em cada ensaio.

A Figura 50 ilustra a evolução do volume de percolado (R) acumulado em 7 dias após as 6 simulações de precipitação realizadas nas datas: 15/05/2012, 22/05/2012, 29/05/2012, 05/06/2012, 12/06/2012 e 19/06/2012.

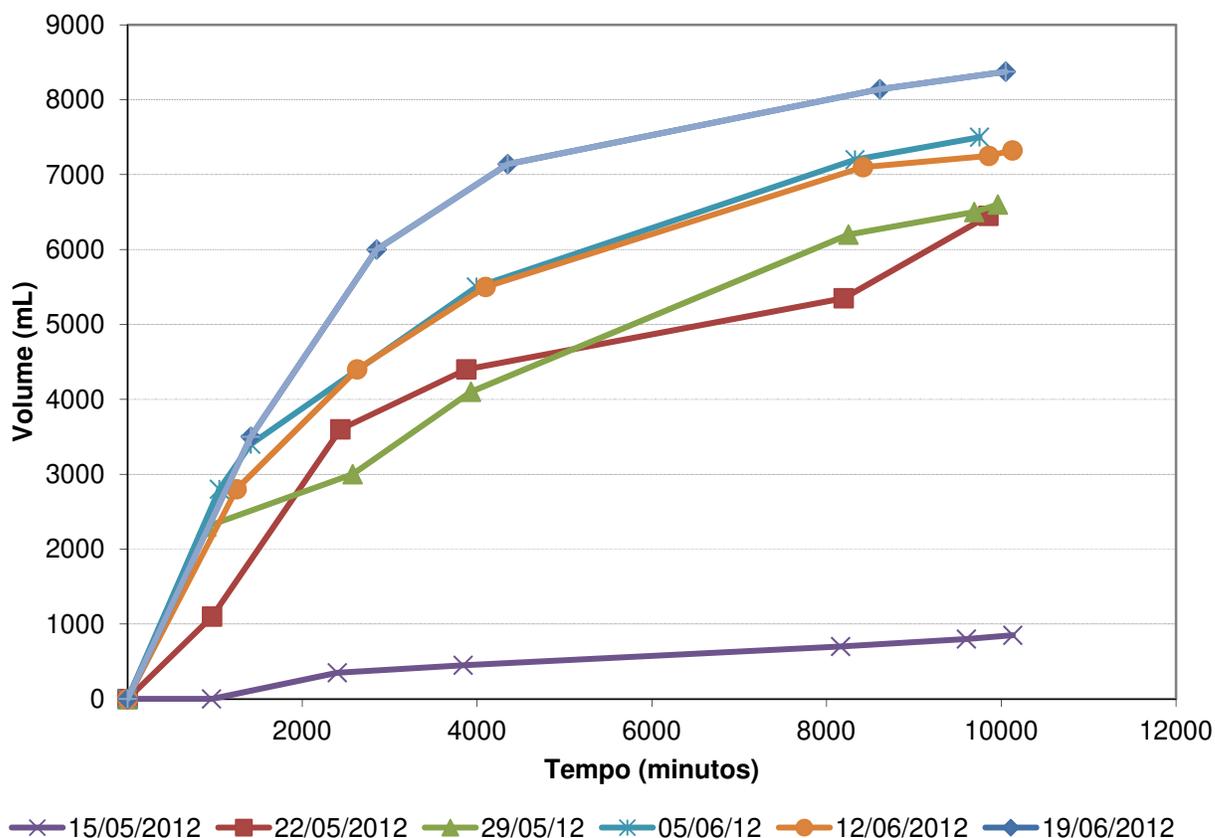


Figura 50-Evolução do Volume Acumulado do Percolado

Observa-se, na Figura 50, um menor volume percolado na primeira simulação de precipitação (850 mL), devido às condições de altas tensões encontradas no lisímetro antes do ensaio, demonstrando que, em caso de baixa umidade inicial, o solo armazenará um teor maior de água para posteriormente ocorrer a percolação. As tensões iniciais, antes da simulação da precipitação do dia 15/05/2012 (Figura 40) foram superiores (tensões variando de 15 a 58 kPa) às tensões da capacidade de campo (33kPa), justificando o maior armazenamento de água no solo e menor volume percolado. Nos demais ensaios (22/05/2012, 29/05/2012, 05/06/2012, 12/06/2012 e 19/06/2012) verificou-se que o volume percolado foi maior (superior a 6450 mL) e iniciou-se logo após a precipitação. As tensões iniciais desses ensaios, nas Figuras (41, 43, 45 e 47), apresentaram valores entre 0,2 a 4 kPa, bem abaixo da capacidade de campo (33 kPa), justificando o volume crescente de percolado (Figura 50) e as taxas iniciais de percolação crescente logo após a precipitação (Figura 51).

Para uma tensão de 33 kPa, de acordo com as CRAS de molhamento e secamento apresentadas nas Figuras 21 a 24, a capacidade de campo do solo ou capacidade de armazenamento de água no solo, foi encontrada, variando de 0,21 a 0,24cm³/cm³ para a profundidade de 0,5 m; 0,27 a 0,32cm³/cm³ para a profundidade de 1,0 m; 0,15 a 0,32 cm³/cm³ para a profundidade de 1,5 m e 0,20 a 0,33cm³/cm³ para a profundidade de 2,0 m.

A taxa de percolação durante as simulações de precipitação pode ser visualizada na Figura 51. Podem-se observar taxas crescentes de percolação nos 800 minutos após a precipitação nos durante e logo após as precipitação com menor variação após 7 dias. Em todas as simulações de precipitação, observou-se um decréscimo acentuado da taxa de percolação após 2000 minutos (33,3 h).

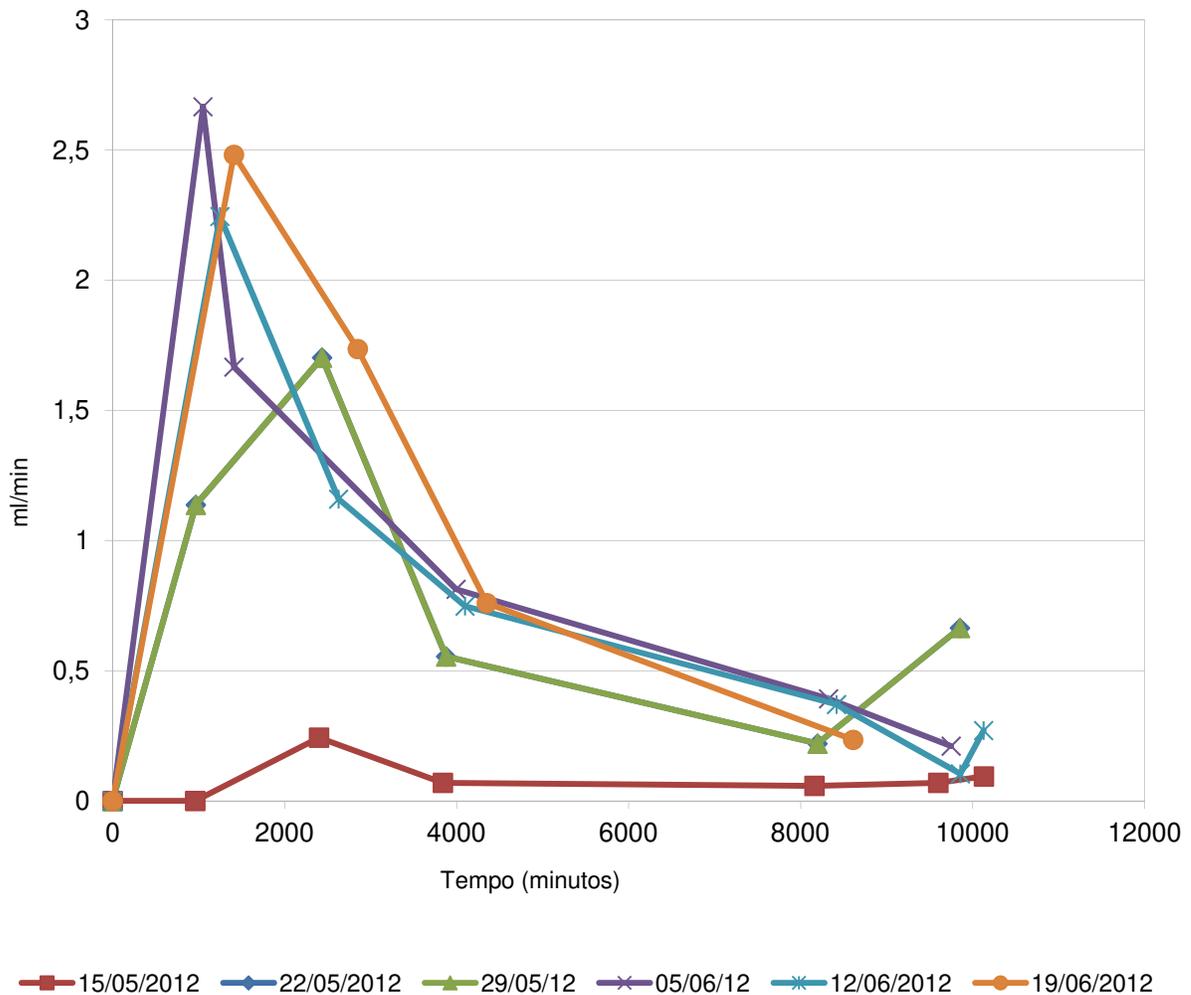


Figura 51-Taxa de percolação

Para os ensaios após uma semana de drenagem, tem-se a variação de armazenamento de água no solo (ΔU_i), calculados utilizando a Equação 17. Esta variação é apresentada na Tabela 02.

Pelos perfis de umidade, tem-se:

$$\Delta U \times Vol = \Delta \theta_{(t)} \times \Delta z \times (1,7 \times 0,2827) \quad (17)$$

Sendo

ΔU é a variação de armazenamento;

Vol o volume do lisímetro;

Δz é a variação de profundidade;

$\Delta \theta_{(t)}$ é variação de umidade volumétrica no lisímetro;

$\Delta U \times Vol$ a variação do armazenamento de água no lisímetro.

Tabela 2 - Variação de Umidade do Lisímetro em %

Prof. (m)	15/mai	22/mai	29/mai	05/jun	12/jun	19/jun
0,22	6,61	-1,78	-0,05	0,11	-0,04	1,75
0,54	8,49	-2,36	-0,07	0,06	-0,05	2,52
0,86	5,36	0,38	0,42	0,19	-0,12	1,88
1,19	5,11	0,16	0,05	0,15	0,06	1,72
1,52	2,65	-0,28	-0,05	-0,12	0,0	1,22

Os valores de variação de armazenamento de água no solo foram calculados de acordo com as tensões encontradas no lisímetro antes das precipitações (Figuras 40, 41, 43, 45 e 47) com base nos parâmetros de calibração das CRAS (Tabela 01) nas referidas profundidades.

Pode-se observar que valores negativos de armazenamento de água no solo (Tabela 2) caracterizam uma perda de água pelo solo no período de 7 dias e valores positivos uma retenção maior de água.

Na Figura 52, é apresentada a variação de armazenamento de água do lisímetro realizando o balanço hídrico conforme Equação 14. Pode-se observar que nos ensaios do dia 15/05/2012 e 19/06/2012 houve maior variação de armazenamento de água no solo, no primeiro houve armazenamento e no último houve perda. Esses resultados estão coerentes com os encontrados na Tabela 2 e Figura 50. O volume percolado foi menor quando o armazenamento de água foi maior e o contrário também foi observado.

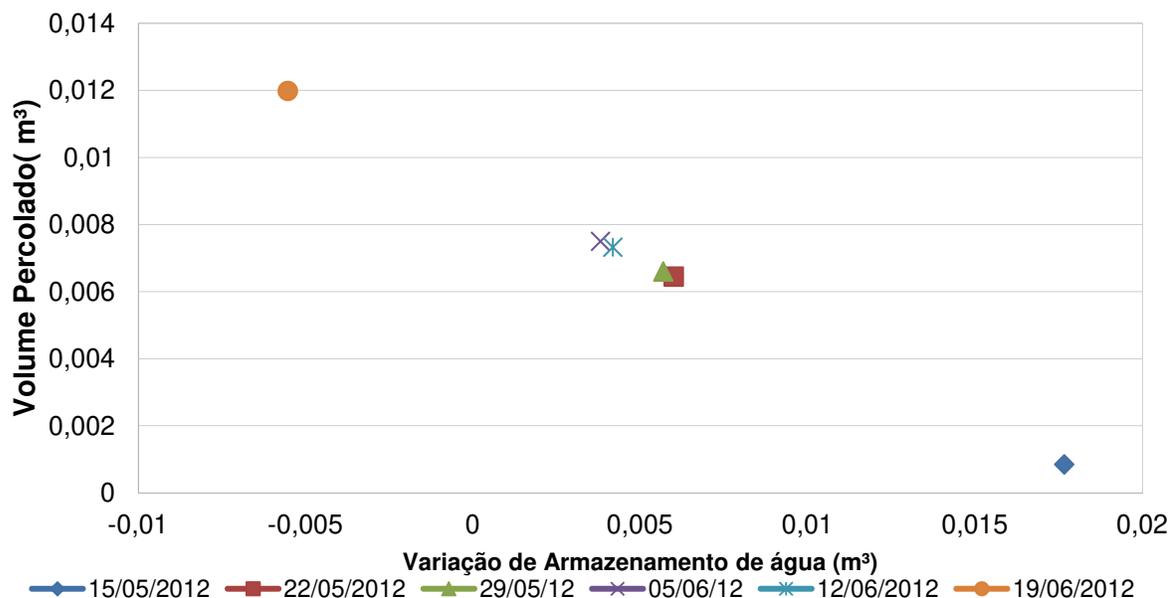


Figura 52-Varição de Armazenamento de Água

Observa-se que quanto maior o volume percolado menor é o armazenamento de água. Quando se tem um solo com um teor de umidade menor, que é o caso do ensaio do dia 15/05/2013 tem-se maior retenção. No último ensaio (19/06/2012), em que o solo estava submetido a tensões entre 0,2 e 4 kPa houve perda de água no solo. Esse comportamento não era esperado já que em tensões semelhantes (ensaio dos dias 22/05/2012, 29/05/2012, 05/06/2012 e 12/06/2012) houve um pequeno aumento do armazenamento de água no solo.

O balanço Hídrico do Lisímetro pode ser visualizado na Tabela 3. Foi estimada a variação do armazenamento de água no solo em litros (L) para o balanço e comparado com os valores medidos.

Tabela 3 - Balanço hídrico do Lisímetro

Período	15 a 22/05	22 a 29/05	29 a 05/06	05 a 12/06	12 a 19/06	19 a 26/05
Volume Irrigado (L)	9,423	9,423	9,423	9,423	9,423	9,423
Volume Percolado (L)	0,85	6,45	6,6	7,5	7,323	8,375
Varição do Armazenamento (L)	2,706	-0,382	0,026	0,037	-0,015	0,867
Resíduo* (L)	5,867	3,355	2,797	1,886	2,115	0,181
Resíduo* (%)	62,26%	35,61%	29,68%	20,02%	22,45%	1,93%

*Resíduo é a diferença do volume precipitado com o somatório da variação de água no lisímetro e volume percolado

Os resíduos (Figura 53) reduzem à medida que o perfil se torna mais úmido. O solo mais seco tem maior variação no perfil de umidade espacialmente e ao longo do tempo e isso dificulta a representação em balanço hídrico ou ainda em simulação numérica. Não foi considerado no balanço a evapotranspiração, que após a precipitação exerce influência no balanço hídrico. O resíduo pode ser considerado como o valor da evapotranspiração.

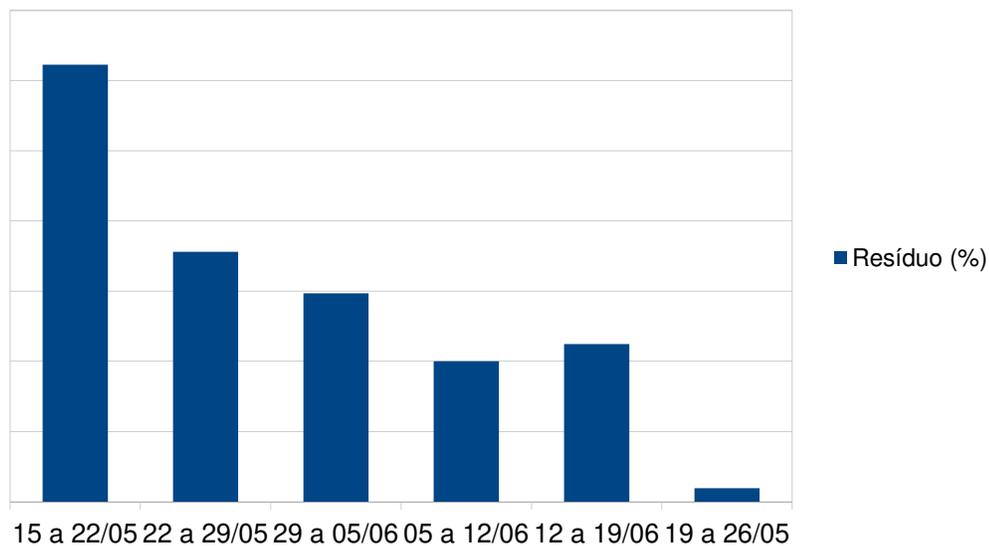


Figura 53-Resíduo do Balanço Hídrico

5.4 Efeito do amolgamento no Índice de vazios e na porosidade

O amolgamento é o fenômeno de destruição da estrutura do solo, com a consequente perda da sua resistência (CAPUTO, 1988, p.50). Segundo o mesmo autor, as estruturas, quanto mais complexas, menos estáveis são, e quando destruídas não poderão ser mais recompostas. A estrutura do solo influencia nos processos de infiltração e armazenamento de água no solo e o seu estudo se faz importante para a compreensão desses fenômenos.

É importante analisar o efeito do amolgamento nas características físicas do solo.

Um corpo de prova de solo será amolgado quando for submetido a algum grau de perturbação. Esse amolgamento resultará em algum desvio do gráfico o log do índice de vazios *versus* tensão efetiva da maneira observada no laboratório a partir do

comportamento real em campo. O gráfico de campo o log do índice de vazios *versus* tensão efetiva pode ser reconstruído com base nos resultados de ensaio de laboratório. (TERZAGHI e PECK, 1967 apud DAS, 2011, p.260).

Para estudar a alteração no índice de vazios do solo é necessário calcular a altura dos sólidos H_s na amostra usando a equação (DAS, 2011):

$$H_s = \frac{W_s}{AG_s\gamma_w} = \frac{m}{AG_s\rho_w} \quad (18)$$

Em que:

W_s = peso seco da amostra

m = massa seca da amostra

A = área da seção transversal da amostra

G_s = peso específico dos sólidos do solo

γ_w = peso específico da água

ρ_w = densidade da água

Para encontrar o índice de vazios inicial, e_0 , da amostra, usa-se a equação:

$$e_0 = \frac{V_v}{V_s} = \frac{H_v A}{H_s A} = \frac{H_v}{H_s} \quad (19)$$

Em que:

V_v = volume de vazios

H_v = altura equivalente aos vazios

Para o primeiro incremento de tensão, σ , (carga total/área unitária da amostra), que provoca uma deformação ΔH_1 , calcula-se a alteração no índice de vazios:

$$\Delta e_1 = \frac{\Delta H_1}{H_s} \quad (20)$$

A diferença entre a base do terreno até a base do topo do amostrador é denominada amolgamento. Considerando-se o amolgamento sofrido pela amostra igual a 0,20m, tem-se $\Delta H_1 = 0,2$ m. Considerando-se a densidade aparente seca média das amostras, tem-se $\rho_d = 1,56$ ton/m³. A partir do volume da amostra do lisímetro, igual a 0,480 m³ e da definição dada pela Equação 2, utilizando-se o mesmo valor de densidade aparente média das amostras para o solo do lisímetro, a massa do solo seco do lisímetro, $m = 0,747$ Kg. A partir da densidade média das partículas $\rho_s = 2,75$ ton/m³, definida pela Equação 1 e da massa das partículas do solo do lisímetro, estimada com o mesmo valor da massa de solo seco do lisímetro, tem-se o volume de partículas $V_s = 0,272$ m³. Assim, $H_s = 0,96$ m.

Então, a variação no índice de vazios é estimada em $\Delta e_1 = \frac{0,2}{0,96} = 0,21$ ou 21%.

A variação na porosidade, por sua vez, é estimada a partir da relação entre índice de vazios e porosidade, dada por:

$$\alpha = \frac{e}{1+e} \quad (21)$$

A variação de porosidade é dada pelos índices de vazios inicial e final (e_0 e e_f), tal que:

$$e_f = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{0,480 - V_s}{V_s} \quad (22)$$

Sendo que $V_s = 0,272 \text{ m}^3$, então $e_f = 0,766$. Logo, $e_0 = e_f + \Delta e_1 = 0,97$

Então, pela Equação 21 $\alpha_0 = 0,49$; $\alpha_f = 0,43$ e $\Delta\alpha = 0,06$.

O amalgamento observado da cravação devido à percussão sofrida pela amostra do lisímetro foi de aproximadamente 0,20 m; correspondente a 10,5% da altura total de cravação, que é compatível com índices obtidos de amostradores. O índice de área no lisímetro de 2% é menor que o índice de área das amostras indeformadas retiradas para a caracterização do solo (10%), ambas as amostras são consideradas indeformadas de acordo com DAS (2011). A variação no índice de vazios de 21% e na porosidade de 6% pode ser estudada por meio de modelagem e realização da previsão do comportamento deste solo sem as variações observadas.

Mesmo com o distúrbio sofrido pelas amostras elas estão dentro de um padrão aceitável de erro para a realização da caracterização e monitoramento do solo.

6 CONCLUSÕES

Os procedimentos de escavação, transporte e instalação do lisímetro foram realizados dentro de um período de 6,25 horas mais o transporte do campo até o laboratório. Este intervalo de tempo é geralmente menor que o período de tempo necessário para a construção de um lisímetro de campo ou ainda o período necessário para a instrumentação de uma pequena bacia. Considerando-se ainda os instrumentos utilizados no lisímetro em laboratório (aspersores, tensiômetros, pluviógrafo, proveta e infraestrutura – reservatórios, tubulações e acessórios) observa-se que existem vantagens logísticas não mensuradas neste trabalho em relação aos procedimentos de instrumentação hidrológica de bacias hidrográficas.

Devido às variações observadas na resistência à penetração do amostrador no solo foi necessário modificar a técnica de escavação de acordo com os sinais de dificuldade apresentados, sendo um desses sinais o peso insuficiente da escavadeira em relação à resistência à penetração e a deformação na borda superior do lisímetro, que em parte foi favorecida pelas aberturas para os vertedores. Para evitar essas deformações deve ser aplicado um reforço estrutural na borda superior do lisímetro. A resistência à penetração determinada no solo não permitiu a cravação estática até a profundidade final, passando à percussão a partir de 0,70 m, conforme calculado. Pode-se concluir que o amalgamento observado após a cravação foi de aproximadamente 0,20 m; correspondente a 10,5% da altura total de cravação, que é compatível com índices obtidos de amostradores.

Durante a simulação de precipitação de 100 mm/h durante 20 minutos como uma chuva intensa com T_r (tempo de retorno) de 10 anos, não houve vazão excedente ou escoamento superficial na amostra. A utilização de aspersores com vazão controlada permitiu a simulação e validação de uma precipitação definida, o que em condições naturais seria difícil.

O uso de lisímetro em laboratório não substitui a prática de instrumentação de bacias nem o uso de lisímetros em campo. Considera-se que o uso de lisímetro em laboratório acarreta em condições ainda artificiais principalmente de precipitação e escoamento superficial direto. Ainda assim, a experimentação de uma amostra de solo indeformado em escala vertical de campo em laboratório, de acordo com os resultados obtidos neste trabalho, representa de forma aproximada o comportamento real da infiltração, percolação e produção de escoamento

superficial direto encontrados em um perfil litológico raso. A realização de ensaios de infiltração na amostra e suas análises permitiram determinar a porosidade e outros parâmetros da C.R.A.S. medidos separadamente em tempo inferior aos ensaios convencionais.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 6508/1984 - Determinação da Massa Específica.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 7181/1984 – Análise Granulométrica.

AGÊNCIA DE ÁGUA PCJ (São Paulo). **Plano das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá 2010 a 2020**: com propostas de atualização do Enquadramento dos Corpos d'Água e de Programa para Efetivação do Enquadramento dos Corpos d'Água até o ano de 2035. São Paulo: SSRH/CRHi, 2007.815 p. (Relatório técnico). Disponível em: <<http://www.comitepcj.sp.gov.br/comitespcj.htm>>. Acesso em: 07 jan. 2012.

ALLAIRE, S. A.; BOCHOVE, E. V. Collecting large soil monoliths. **Canadian Journal of Soil Science**, Québec - Canadá, p. 885-896. 14 ago. 2006.

BERGSTROM, L. Use of lysimeters to estimate leaching of pesticides in agricultural soils. **Environ. Pollut.** v.67. 325-347.1990.

BERTOLANI, F.C.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e da espessura do horizonte A, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes usos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.25, p.987-995, 2001.

BEWS, B. E., O'KANE, M.A., WILSON, G.W., WILLIAMS, D., CURREY, N. **The design of a low flux cover system, including Lysimeters, for acid generating waste rock in semi-arid environments**. Proceeding of the 4th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD). Vancouver, B.C. v.2. p.747-762, 1997.

BOND, W.R. ROUSE, J.V. Lysimeters Allow Quicker Monitoring of Heap Leaching and Tailings Sites. **Mining Engineer** (Littleton, Colo) v.37 n.4 p.314-319. 1985.

BULUT, R. and LEONG, E. C. Indirect measurement of suction. **Geotechnical and Geological Engineering J.**, Vol. 26 (6). 633-644. 2008.

BONTA, J. V.; RAO, A. R. Estimative peak flows small agricultural watersheds. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [S.l.], v.118, n. 1, 122-137,1992.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas aplicações**, vol.2: Fundações e Obras de Terra / Homero Pinto Caputo. – 6 ed., rev e ampl., Rio de Janeiro: LTC, 1997.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas aplicações**, volume 1:fundamentos / Homero Pinto Caputo. – 6 ed., rev e ampl., Rio de Janeiro: LTC, 1988.

CHANDLER, R. L.; CRILLY, M. S.; MONTGOMERY-SMITH, G. **A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise building**. Proc. Of the Institution of Civil Engineering, p. 82-89. 1992.

DAM, J. C. van; HUYGEN, J.; WESSELING, J. G.; FEDDES, R. A.; KABAT, P.; WALSUM, P. E. V.; GROENENDIJK, P.; DIEPEN, C. A. van. 1997. **Theory of SWAP version 2.0: simulation of water flow, solute transport and plant growth in the soil – water – atmosphere – plant environment**. Wageningen: Wageningen Agricultural University/DLO. 167p.

DAM, J. C. van. 2000. **Field-scale water flow and solute transport: SWAP model concepts, parameter estimation and case studies**. Wageningen: Wageningen Agricultural University. 167p. PhD thesis.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

Dourado Neto, D.; Nielsen, D. R.; Hopmans, J. W.; Reichardt, K.; Bacchi, O. O. S. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 3.00). **Scientia Agricola**, v.57, p.191-192, 2000.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. John Wiley and Sons Inc. New York, NY. 1993.

GRIEBELER, N.P.; PRUSKI, F.F; MARTINS JÚNIOR, D.; SILVA, D.D. Avaliação de um modelo para a estimativa da lâmina máxima de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. V.25, p. 411-417. 2001.

LANTHALER, C. **Lysimeter Station and Soil Hydrology Measuring Sites in Europa: Purpose, Equipment, Research Results, Future Developments**. Thesis Magistra der Naturwissenschaften. School of Natural Sciences – Department for Water Resources Management, Graz. 147 p. 2004.

LATRON, J.; GALLART, F. Runoff generation processes in a small Mediterranean research catchment (Vallcebre, Eastern Pyrenees), **Journal of Hydrology**, [S.I], v. 358, n.3-4, 206-220, 2008.

LUCAS, J. F. R.; TAVARES, M. H.; CARDOSO, D. I.; CÁSSARO, F. A. M. Curva de Retenção de Água no Solo pelo Método do Papel-Filtro. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. p. 1957-1973, 2011.

MARINHO, F. A. M. **Os Solos Não Saturados: Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados**. Texto apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para o Concurso de Livre-Docência na especialidade "Geomecânica" do Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. São Paulo. 202 p. 2005.

MENDONÇA, L. A. R.; VÁSQUEZ, M. A. N.; FEITOSA, J. V.; OLIVEIRA, J. F.; Franca, R. M.; VÁSQUEZ, E. M. F.; FRISCHKORN, H. Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo, **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.I], v.14, 89-98, 2009.

- MIYAZAKI, T. **Water flow in soils**. 2. ed. Boca Raton: Taylor and Francis, 2006. 418p.
- NICHOL, C. F.; ROWLETT, D. K. e BARBOUR, S. L. A new standpipe lysimeter design for the measurement of soil matric suction. **Vadose Zone Journal**, [S.l.], v.7, n.3, 919-929, 2008.
- PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D. **Escoamento Superficial**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2004. 87 p.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações** Barueri, SP: Manole, 2004. 478 p.
- RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos hidrológicos para Gestão Ambiental**. Relatório técnico parcial. Dez, 2000.
- ROWLETT, D. K. **Development of a Stand-Pipe Lysimeter for Unsaturated Wast Rock**. 2000. 205 p. Tese (Doutorado em Ciência) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Saskatchewan, Saskatoon, Canadá, 2000.
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos; Coordenadoria de Recursos Hídricos. **Relatório de Situação dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo**. São Paulo: SSRH/CRHi, 2011.208 p.
- SARTORI, A. **Avaliação da classificação hidrológica do solo para a determinação do excesso de chuva do método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, SP: [s.n.], 2004.
- TEIXEIRA, V.G; COUTINHO, F.M.B; GOMES, A.S. Principais métodos de Caracterização da Porosidade de Resinas a Base de Divinilbenzeno. **Química Nova**, v.24, n.6, p. 808-818, 2001
- TUCCI, C.E.M. (org). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre. UFRGS/EDUSP/ABRH.1993. 952p.
- UEHARA, K; ZAHED FILHO, K; SILVEIRA, L. N. L.; EIGER, S. E PALERMO, M. A. (1980). **Pequenas bacias hidrográficas do Estado de São Paulo** – Estudo de vazões médias e máximas. FDTE/Escola Politécnica da USP, São Paulo, S. P., vol.2, 708p.
- van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 44:892-898, 1980.
- WICKLAND, B., 1998. Lysimeter Backfill Design. Tese apresentada à universidade de Saskatchewan, saskatoon, SK, Canada. 1998.