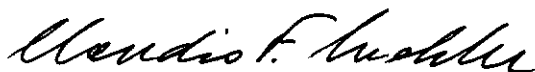


**INSTRUMENTAÇÃO AUTOMATIZADA PARA MENSURAÇÃO DA
ÁGUA NO SOLO EM MINI-LISÍMETROS PARA FINS DE ESTUDOS
AMBIENTAIS**

Carlos André Ribeiro Mendes

**TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.**

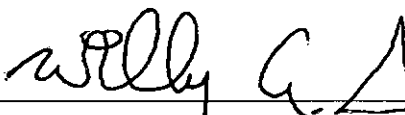
Aprovada por:



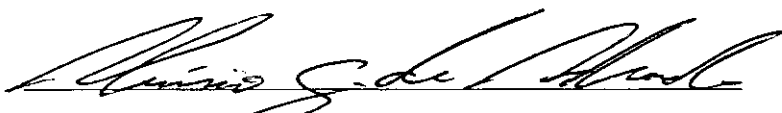
Prof. Cláudio Fernando Mahler, D. Sc.



Prof. Nelson Ferreira Fernandes, Ph. D.



Prof. Willy A. Lacerda, Ph. D.



Dr. Aluisio G. Andrade, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

DEZEMBRO DE 2000

MENDES, CARLOS ANDRÉ RIBEIRO

**Instrumentação Automatizada Para Mensuração
da Água no Solo em Mini-Lisímetros Para Fins
de Estudos Ambientais [Rio de Janeiro] 2000**

**VII, 130 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Civil, 2000)**

**Tese – Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE**

- 1. Lisímetros**
- 2. Instrumentação de Solo**

I. COPPE/UFRJ

II. Título (série)

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

INSTRUMENTAÇÃO AUTOMATIZADA PARA MENSURAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO EM MINI-LISÍMETROS PARA FINS DE ESTUDOS AMBIENTAIS

Carlos André Ribeiro Mendes

Dezembro/2000

Orientadores: Cláudio Fernando Mahler

Nelson Ferreira Fernandes

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho visa contribuir para os estudos de interação solo-água-ambiente, através da análise e do estudo do comportamento de resultados obtidos em diferentes instrumentos automatizados, como tensiômetros, equitensiômetros, geotermômetros, TDR e obtidos com o método de papel filtro, todos instalados em mini-lisímetros montados em laboratório. A escolha destes instrumentos utilizados em conjunto, foi devida à necessidade de obter ao mesmo tempo, respostas rápidas e detalhadas da dinâmica hidrológica dos solos. Os instrumentos foram devidamente calibrados para instalação nos mini-lisímetros. Assim, foram simulados em laboratório, diversos ciclos de saturação e drenagem em um conjunto de 3 mini-lisímetros, respectivamente instrumentados, sendo que as condições ambientais da sala onde foram realizados os ensaios também foram monitoradas. Os instrumentos automatizados foram conectados a um sistema de aquisição de dados (*data logger*), tendo com isso, um monitoramento preciso dos processos citados anteriormente. Os resultados obtidos, demonstraram que a combinação, calibração, configuração dos instrumentos utilizados, com os valores medidos, foi bastante significativa para o entendimento dos processos hidrológicos no solo .

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

AUTOMATED INSTRUMENTATION IN MINI-LISIMETERS FOR MEASUREMENT OF THE WATER IN THE SOIL FOR PURPOSES OF THE ENVIRONMENTAL STUDIES

Carlos André Ribeiro Mendes

December/2000

Advisors: Cláudio Fernando Mahler

Nelson Ferreira Fernandes

Department: Civil Engineering

This work seeks to contribute for the studies of interaction soil-water-atmosphere, through of the analyze and the study the behavior of the data obtained in different automated instruments as tensiometers, equitensiometers, geo-termometers, TDR and obtained with the method of filter paper, installed in mini-lysimeters constructed in the laboratory. The choice of these instruments used together was due the need to obtain at the same time, fast and detailed answers of the hydrology dynamics of the soils. The instruments were calibrated before the installation in the mini-lysimeters. So, several saturation cycles and drainage were simulated in laboratory in a group of 3 mini-lysimeter respectively scored. The environmental conditions of the room where the research were done were also controlled. The automatic instruments were connected to data logger, what allowed a precise monitoring of the processes mentioned previously. The obtained results, showed that the combination of the calibration, configuration of the used instruments, together to the measured values, presented quite significant results for the understanding of the hydrological processes in the soil.

Agradecimentos

A todos vocês:

Cláudio Mahler, Nelson Fernandes, Andréa Paula, Maria Cláudia, Maria da Graça, Roberto Oliveira, Ricardo Gil, Luiz Mario, Beth, Rita, Jairo, Prof. Bonapace, Marcus Gervázio, Lúcia Helena, Paulo Guilherme, Aldo, Lucas Rocha, Marcel, Rubens, Terezinha, Fábio e Flávio Mendes, D^a. Érica e Carlos Kuchler, Tia Ivonilde, Antônio Ricardo, Markus Klein, André Torre, Matheus, Beto, Ana Cris, Bianca, Mario Diamante, Nestor, Margô, Carlinha, Ana Valéria, Márcio Cataldi, Valeska, Edna, Marcela, Hélder, Lucas, Vanilda, Larissa Baruque, Rosimary, Patrícia, Tatiana, Luíza, Júlio, Adriana Schueler, Andréa, Eduardo, Serginho, André e Daniel Matos, Rodrigo Santiago, Flávia e Gustavo, Carlinhos, Alexandre Figueiredo, Idriss, Rodrigo Rodriguez, Fábio Cazuza, Ana Maria, Marcus Bistene, Fábio Daniel, Marcius Ney, Paulo Henrique Garrú, Evandro Giamuzzi, Paulo Ricardo Diniz, Jorgão, Abdon Nogueira, Diego Mureb, Nelson, Marley, Vitor e Alexandra, amigos do “221”, Centro Cultural Senzala, Vale Sempre Verde, Ilha Grande, Barra de Guaratiba, Sul de Minas, Geotecnia, COPPE, IGEO/CCMN EMBRAPA/CNPS, fundação Wolkswagen da Alemanha, CNPq, e principalmente a D^a. Glória, Seu Karlão, Angélica e Alberto...

Sou eternamente grato

Pela confiança,

Pelo incentivo nos momentos mais difíceis,

Pelo apoio constante durante a realização deste trabalho.

Carlos André R. Mendes

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO

1.1 Um Breve Histórico do Tema.....	3
1.2 Metodologia da Pesquisa.....	4
1.3 Objetivos.....	6

2. CARACTERÍSTICAS DOS LISÍMETROS

2.1 <u>Lisímetros Sem Controle de Peso</u>	9
2.1.1 Lisímetros de Percolação.....	10
2.2 <u>Lisímetros Com Controle de Peso</u>	11
2.2.1 Lisímetros de Pesagem Mecânica.....	11
2.2.2 Lisímetro Flutuante.....	13
2.2.3 Lisímetro Hidráulico.....	16
2.3 <u>Descrição dos Mini-Lisímetros</u>	17

3. CONCEITOS GERAIS DO BALANÇO HÍDRICO

3.1 <u>Ciclo da Água</u>	22
--------------------------------	----

4. CONCEITOS GERAIS DE FÍSICA DOS SOLOS

4.1 <u>Fases do Solo</u>	24
4.1.1 Energia Potencial da Água do Solo.....	25
4.1.2 Capilaridade.....	26
4.1.3 Sucção do Solo.....	28
4.1.3.1 Sucção Matricial.....	28
4.1.3.2 Sucção Osmótica.....	28
4.1.3.3 Sucção Total.....	29

5. INSTRUMENTAÇÃO

5.1 <u>Métodos Diretos de Determinação da Umidade</u>	32
5.1.1 Sensor de Umidade – TDR.....	32
5.1.1.1 Sonda Theta ML2.....	41
5.2 <u>Métodos Indiretos de Determinação da Umidade</u>	45
5.2.1 Tensiômetros - Princípios de Funcionamento.....	45

5.2.2 Tensiômetros Automatizados.....	49
5.2.2.1 Tensiômetro Utilizado no Trabalho.....	52
5.2.2.2 Tensiômetro de Equivalência (Equitensiômetro).....	53
5.2.3 Papel Filtro.....	57
5.3 <u>Geotermômetro</u>	61
5.4 <u>Sistema de Aquisição de Dados Automatizados</u>	62
5.4.1 Data - Logger DL2e.....	62
6. MATERIAIS E MÉTODOS	
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	
7.1 <u>Caracterização do Solo Estudado</u>	71
7.1.1 Granulometria.....	73
7.1.2 Textura.....	74
7.1.3 Estrutura.....	75
7.1.4 Índice de Plasticidade e Limite de Líquidos.....	75
7.1.5 Curvas de Retenção de Umidade.....	75
7.2 <u>Ensaio de Saturação e Drenagem</u>	77
7.3 <u>Instrumentação</u>	81
8. CONCLUSÕES	
8.1 <u>Sugestões para Pesquisas Futuras</u>	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
APÊNDICES	

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas o crescimento demográfico mundial vem aumentando numa progressão alarmante, principalmente nos grandes centros urbanos e áreas metropolitanas, gerando conflitos de ordem social e econômica. Dados da FAO (2000), apontam o crescimento anual da população urbana, ao redor de 60 milhões de pessoas. Estima-se que em meados 2025 a população global atingirá 10 Bilhões de pessoas. Atualmente existem por volta de 200 cidades com população superior a 1 milhão de pessoas.

Esse avanço no crescimento demográfico, paralelo ao desenvolvimento tecnológico, tem um alto custo ambiental, através do uso maciço de recursos naturais como água e solo, seja pela intensificação da agricultura tecnificada, que é extremamente dependente de insumos químicos, ou pela sobrecarga de resíduos sólidos, despejados em áreas periféricas, não havendo na maioria dos casos, um estudo detalhado dos impactos ambientais.

Embora não haja ainda um modelo padrão de áreas potenciais de disposição de resíduos sólidos e considerando que existam situações adversas, variando de região para região e de material disponível, esses depósitos de resíduos sólidos geralmente são grandes áreas de deposição desses materiais, onde são dispostos, compactados e cobertos com uma camada de solo predominantemente de fração argilosa para atenuar a difusão de fluidos, principalmente o chorume, fazendo com que esses materiais fiquem confinados. Logo após a cobertura desse "liner" argiloso, sobre os resíduos sólidos, é feita então a compactação do solo, recomeçando todo o processo, assim como há um sistema de captação e drenagem do líquido percolado, no qual é tratado ou recirculado no aterro.

No estudo da interação solo-água-contaminante tem sido feitas várias simulações dentro ou fora de laboratórios específicos, no qual o solo de interesse é confinado e colocado em contato com o fluido alvo. Sabe-se que a percolação de substâncias químicas de solos poluídos para a água subterrânea está conectada ao balanço hídrico do solo, MAHLER (1998). Em laboratórios são feitos principalmente ensaios de coluna, no qual se determinam principalmente o fluxo vertical desses compostos, ou ainda experimentos podem ser realizados através da construção de lisímetros. Esses lisímetros geralmente são usados em estudos de campo, no qual pode-se trabalhar com amostras de solo indeformado, lisímetros monolíticos de maior fidelidade, ou ainda amostras deformadas, respeitando a ordem da disposição dos horizontes no local de coleta. Os

lisímetros podem ser instrumentados, através de sensores em diferentes profundidades, que medem a umidade, a temperatura, a salinidade, o pH, a condutividade hidráulica, a permeabilidade, etc. No campo agrícola os lisímetros são utilizados em estudos de irrigação, determinando-se a evapotranspiração de determinadas culturas de interesse. Em aterros sanitários, os lisímetros são instalados próximos ao local e empregados no estudo do balanço hídrico na região, de forma a possibilitar um melhor projeto e controle da vegetação do aterro, no ato de seu fechamento ou para auxílio dos fluxos água-chorume no mesmo durante seu funcionamento.

Apesar da notoriedade do risco de impacto ambiental que essas questões vem causando, há ainda muito trabalho de pesquisa e estudos para melhor compreensão da interação solo-água-contaminante, com relação a sua degradação, química e biológica, movimentação e migração, a percolação, o fluxo vertical e lateral, a adsorção, a advecção e a volatinização, dentre outros processos. Atualmente, muitas disciplinas, como a Ciência dos Solos, a Hidrologia, a Ciência das Plantas, a Engenharia Civil e Ambiental, possuem áreas de pesquisa que requerem o entendimento do transporte de solutos no solo, e suas interações.

1.1 Um breve histórico do tema

O uso de lisímetros não é tão precoce, havendo registros do uso de equipamentos como estes de mais de trezentos anos (ABOUKHALED *et al.*, 1986). Uma das primeiras investigações com lisímetros data de 1668, quando De la Hirem, um matemático e meteorologista do Rei Luís XIV, usou tanques de chumbo preenchidos com uma camada argilo siltosa e observou que havia mais água evaporada nos lisímetros em que havia grama plantada, do que nos com solo desprovido de plantas. O primeiro lisímetro construído com um bloco de solo indeformado data de 1870 na Inglaterra (Rothamsted) e o construído com instrumentos de pesagem datam de 1906 na Alemanha, sendo que o primeiro utilizando equipamentos de medição automatizada foi construído em 1937. Estes instrumentos tinham como objetivo aferir os principais componentes do ciclo hidrológico, ou seja, a percolação profunda, a evapotranspiração, a precipitação e o *runoff* (escoamento superficial).

Originalmente os lisímetros foram empregados para estudar a velocidade e quantidade de água percolada. Posteriormente, análises químicas do material percolado foram também incluídas, mas só a partir do século XX que os lisímetros foram usados para o estudo da evapotranspiração. Da década de 50 em diante, os lisímetros passaram a ser usados de forma mais intensa para estudos micrometeorológicos, sendo utilizados para o desenvolvimento e validação de modelos numéricos e analíticos, na finalidade de estudar as relações água-solo-planta-atmosfera.

Nesse período, e em especial nas últimas quatro décadas, desenvolveram-se diversas variantes de dois tipos de lisímetros: com e sem peso, que serão descritos no capítulo seguinte.

O sistemas de aquisição automática de dados evoluíram consideravelmente nas últimas duas décadas, principalmente, devido aos avanços da eletrônica digital e ao advento dos microprocessadores. A tecnologia atual possibilita a construção de sistemas microcontrolados bastante eficientes e a baixos custos. Inúmeras são as áreas que se beneficiam com esses sistemas, tais como: as indústrias, a medicina, as pesquisas espaciais, a oceanografia e a agricultura, entre outros.

Na área da agricultura, os trabalhos em que se utilizam do monitoramento automático de sensores no campo, agricultura de precisão, têm contribuído não somente para o aumento da produtividade, mas também para a melhoria da qualidade dos produtos agrícolas e para a preservação do meio ambiente (NETO, M. D. A., 1995).

1.2 Metodologia da Pesquisa

O presente trabalho de pesquisa foi essencialmente um trabalho de laboratório, no qual os aspectos mais relevantes constituíram-se dos seguintes procedimentos:

1º Estudo do funcionamento dos diversos equipamentos para medição automatizada de umidade e sucção matricial recebidos através da fundação Volkswagen que compreendem:

- Tensiômetros automatizados
- Tensiômetros de Equivalência (Equitensiômetro)
- Reflectômetro de Domínio de Tempo (TDR)
- Geotermômetro
- Sistema de aquisição e armazenamento de dados automatizados (*data logger*)

2º Estudo dos procedimentos de utilização do método do papel filtro para medição de sucção total e sucção matricial;

3º Estudos da sistemática de preparo de lisímetros em campo e no laboratório;

4º Preparo dos mini-lisímetros construídos em laboratório para desenvolvimento do trabalho;

5º Estudo, escolha e preparo do material de solo, colocado no interior dos mini-lisímetros;

6º Escolha da instrumentação a ser colocada nos mini-lisímetros, testes de funcionamento, instalação e adaptação com *data logger*, o computador e o *software*, para leitura e armazenamento dos dados;

7º Coleta de resultados, preparo de gráficos e análises;

8º Comparação dos resultados obtidos em cada um dos mini-lisímetros pelos diferentes equipamentos;

9º Análise dos resultados obtidos considerando as condições de temperatura, umidade e quantidade de água adicionada e coletada em cada um dos tanques;

10º Análise final dos resultados, relação e preparo da dissertação.

Conforme descrito acima, o presente trabalho de pesquisa visou desenvolver novos mini-lisímetros de laboratório, testar, comprovar e comparar resultados oriundos de equipamentos e formas de determinação direta de umidade e sucção no solo.

Como não houve o estabelecimento de nenhuma hipótese a ser comprovada seja numericamente, ou através de ensaios de laboratório ou entrevistas de campo fica difícil apresentar uma metodologia específica. Optou-se assim, por descrever as diversas etapas que foram necessárias para o desenvolvimento do trabalho do presente trabalho.

1.3 Objetivos

Fazia inicialmente parte deste projeto a recuperação de um conjunto de lisímetros (vide Apêndice) instalados na Estação Experimental de Agrometeorologia localizado no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Embora contando com financiamento da Fundação Volkswagen, não foi possível até o presente colocar em funcionamento os lisímetros e a Estação Agrometeorológica, tendo-se optado por desenvolver o trabalho com o auxílio de mini-lisímetros de laboratório respectivamente instrumentados, conforme descrito no item 2.3. Por outro lado, a utilização destes instrumentos e equipamentos, em campo, sem uma total aferição e domínio de suas técnicas e limitações, assim como a falta de calibração entre eles, poderiam comprometer os dados esperados nos ensaios de campo. Daí a importância e a necessidade de se trabalhar em laboratório anteriormente a instalação em campo, para um efetivo domínio das limitações individuais destes equipamentos e instrumentos.

Os objetivos desta pesquisa compreenderam:

- Montagem de mini-lisímetros em laboratório;
- Estudo do funcionamento de uma série de equipamentos para medida de sucção, temperatura e umidade automática do solo, interfaceados a um *data logger* e um microcomputador, além do uso do papel filtro;
- Analisar as possíveis correlações entre os resultados e as calibrações dos equipamentos utilizados instalados nos mini-lisímetros considerando as variações do percentual de água do solo.

2. CARACTERÍSTICAS DOS LISÍMETROS

Os lisímetros são definidos como “recipientes” de grandes volumes de solo, com superfície coberta ou não por vegetação, representando as condições ambientais de campo onde são instalados. Este sistema é utilizado para estudar o balanço hídrico em um perfil de solo e os processos físicos que interagem com o mesmo.

Em linhas gerais, os lisímetros são tanques enterrados em uma superfície plana, com um sistema coletor de drenagem instalado no fundo, preenchidos com solo. Na construção dos lisímetros, a criatividade na busca de materiais para executá-lo é fundamental, porém deve ser procedida com embasamento teórico conhecido.

O preenchimento dos tanques pode ser feito com solo desestruturado ou indeformado, desde que seja respeitado a ordem dos horizontes do perfil de origem. Esses blocos com ou sem deformação, são removidos destes locais e acondicionados nos “recipientes” na própria área de estudo, devido às condições reais de ambiente (estrutura do solo, umidade relativa, precipitação, temperatura, insolação, etc.), sendo o mais recomendado. Quando não é possível a instalação do lisímetro no próprio local, este pode ser projetado e construído em outros locais, e receber o solo das áreas que se quer monitorar.

O conhecimento do movimento da água na superfície do solo e através de seu perfil, a absorção, a evaporação e o uso da água pelas culturas é necessário para seu melhor emprego e controle. O conhecimento dessas relações entre água-solo-planta-atmosfera é de grande importância na agricultura, proporcionando aos técnicos uma melhor utilização das práticas de cultivo, não só para economia da água e redução das perdas por erosão como para aumento da produção. Desse modo, o lisímetro é utilizado no ambiente agrícola, como um equipamento de determinação direta da evapotranspiração ETo, sendo o método mais preciso para essa finalidade. Grande parte dos estudos sobre lisímetros, focalizam o balanço hídrico, problemas sobre fertilidade dos solo, migração de contaminantes, dentre outros, sendo poucos os que cuidam de sua instalação (BERTONI *et al.*, 1976). BERNARDO (1995), sugere que alguns cuidados devem ser obedecidos durante a instalação de um lisímetro.

Os pontos básicos na instalação de um lisímetro são:

- Ele deve ser suficientemente largo, de modo que reduza o efeito da sua parede interna e tenha uma área de tamanho significativo, em torno de $2,0 \text{ m}^2$.
- Ele deve ser suficientemente profundo, de modo que evite restringir o desenvolvimento do sistema radicular das plantas nele cultivadas. De modo geral, para as plantas de sistema radicular pouco profundo, o volume mínimo de terra em um lisímetro deve ser de $2,0 \text{ m}^3$.
- As condições físicas do solo dentro do lisímetro precisam aproximar-se, tanto quanto possível, das condições do solo do local de origem, e deve-se controlar o lençol freático dentro dele, de modo que não torne as condições de umidade interna diferentes das do solo externo.
- A vegetação plantada dentro do lisímetro deve ser da mesma espécie, altura e densidade da vegetação externa.
- Nunca se deve colocar um lisímetro dentro de uma área sem vegetação.
- O lisímetro deve ser instalado em uma área plana, homogênea em cultura e solo, de dois hectares, no mínimo.

Existem diversos modelos de lisímetros, instalados em campo ou em laboratório. Na instalação dos lisímetros de campo existem duas alternativas de uso: uma é estudar o movimento da água no solo, sem removê-lo, instalando um sistema de drenagem em um ponto de cota mais baixa e a outra é remover o solo do local e confina-lo em recipientes. Existe ainda a alternativa de se estudar o perfil *in situ* (Figura 2.1), caracterizado pela fácil instalação e baixo custo, porém, não é tão recomendada, devido à descontinuidade hidráulica gerada no perfil (NETO, M.D.A., 1995).

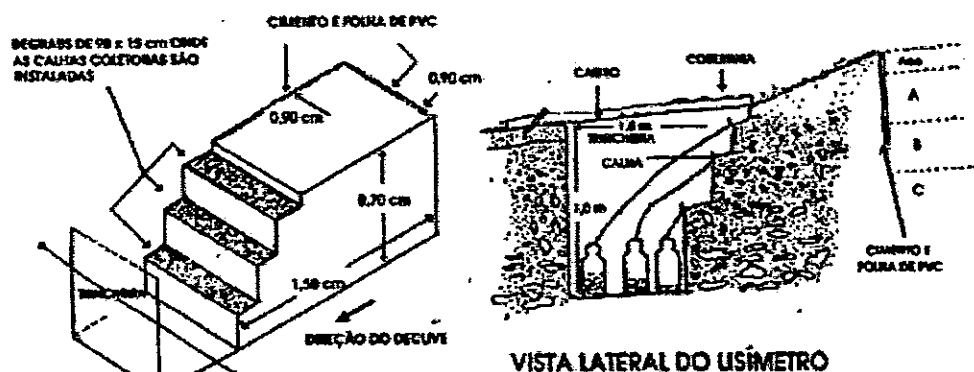


Figura 2.1 Esquema de um lisímetro escavado no solo, onde são vistos os "degraus" correspondentes aos horizontes do solo e onde ficam as calhas para coleta do fluxo lateral e os vasilhames para armazenamento da água (NETO, M.D.A., 1995).

Os lisímetros de campo, basicamente são divididos em dois grupos: os **lisímetros sem controle de peso** e os **lisímetros com controle de peso**. Segundo YOUNG *et al.* (1996), os lisímetros com controle de peso são tanques apoiados em balanças, tornando-se uma ferramenta valiosa para pesquisas agrônômicas, pois permite mensurações diretas nas mudanças em massa atribuídas diretamente ao uso de água pelas plantas. Entretanto, mecanismos sem pesagem podem somente quantificar, a percolação profunda, através das mudanças medidas pelo conteúdo de água, com relação ao tempo e profundidade, resultando em um grau precisão menos efetivo no estudo destes processos.

2.1 Lisímetros Sem Controle de Peso

Os lisímetros sem controle de peso são também chamados volumétricos ou com drenagem ou compensação. Seu suprimento de água ocorre por chuva natural, por irrigação, ou sistema de água mantido artificialmente, sendo que são os chamados lisímetros de nível de lençol freático constante.

2.1.1 Lisímetro de Percolação

Consiste em se enterrar um tanque, com as dimensões mínimas de 1,5 m de diâmetro por 1,0 m de altura, no solo, deixando a sua borda superior 5,0 cm acima da superfície (Figura 2.2). Do fundo do tanque sai um cano que conduzirá a água drenada até um recipiente. O tanque tem que ser cheio com solo do local onde será instalado o lisímetro, mantendo a mesma ordem dos horizontes. No fundo do tanque, coloca-se uma camada de mais ou menos 10,0 cm de brita coberta com uma camada de areia grossa. Essa brita tem a finalidade de facilitar a drenagem d'água que percolou através do tanque. Após instalado, planta-se grama no tanque e na sua área externa.

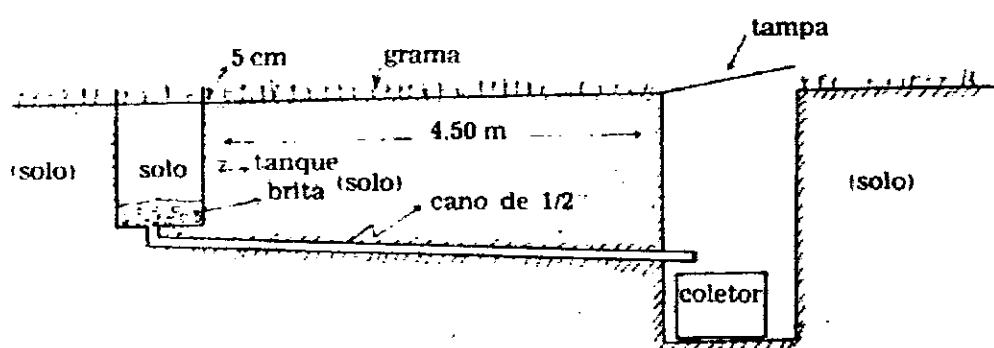


Figura 2.2 Esquema de um Lisímetro de Percolação, onde são vistos o tanque enterrado no solo, preenchido brita no fundo e sistema coletor de drenagem (BERNARDO, 1995).

O tanque pode ser um tambor, pintado interna e externamente, para que evitar corrosão, tanque de amianto ou um tanque de metal pré-fabricado.

A evapotranspiração potencial de referência em um período de tempo é dada pela equação:

$$ET_o = \frac{I + P - D}{S} \quad (1)$$

Onde:

ETo = evapotranspiração potencial de referência, em mm;

I = irrigação do tanque, em litros;

P = precipitação pluviométrica no tanque, em litros;

D = água drenada do tanque, em litros;

S = área do tanque, em m^2 .

Sendo o movimento da água no solo um processo relativamente lento, os lisímetros de percolação somente tem precisão para períodos mais ou menos longos.

A determinação da ETo deverá ser em termos de médias semanais, quinzenais ou mensais. Os tanques precisam ser irrigados diariamente ou a cada dois dias, com uma determinada quantidade de água, de forma que a água percolada seja em torno de 10% do total aplicado nas irrigações (BERNARDO, 1995).

2.2 Lisímetros Com Controle de Peso

Os lisímetros com controle de peso por outro lado compreendem diversos processos e equipamentos de pesagem. Podem basear-se em processos de pesagem mecânicos, com variedades de escalas e balanças, ou processos de pesagem eletrônicos, com células de carga e medidores de deformação, ou enfim, sistemas de medição hidráulica. Os sistemas de medição hidráulica apresentam ainda duas variantes: lisímetro hidráulico, no qual as mudanças de peso são medidas através de células de carga hidráulica e o lisímetro flutuante no qual as variações de peso são medidas por variação na flutuabilidade.

2.2.1 Lisímetro de Pesagem Mecânica

Como todo lisímetro pesável, o lisímetro de pesagem mecânica permite a determinação da evapotranspiração ET em períodos curtos, ET - horária ou diária, o que não acontece com os lisímetros sem controle de peso. Ele é imprescindível em centros, de modo que se possa calcular os coeficientes de correção, para os métodos indiretos ou empíricos de determinação da ETo .

Consiste em um tanque apoiado sobre uma balança mecânica (Figura 2.3). O conjunto fica dentro de um tanque externo. O tanque interno é livre e apóia-se somente

sobre a balança, a qual acusa toda variação de seu peso, ou seja, a perda d'água evapotranspirada. As mesmas considerações, no que diz respeito à área, à profundidade e ao solo se vê em relação ao lisímetro-drenagem, são válidas para qualquer tipo de lisímetro.

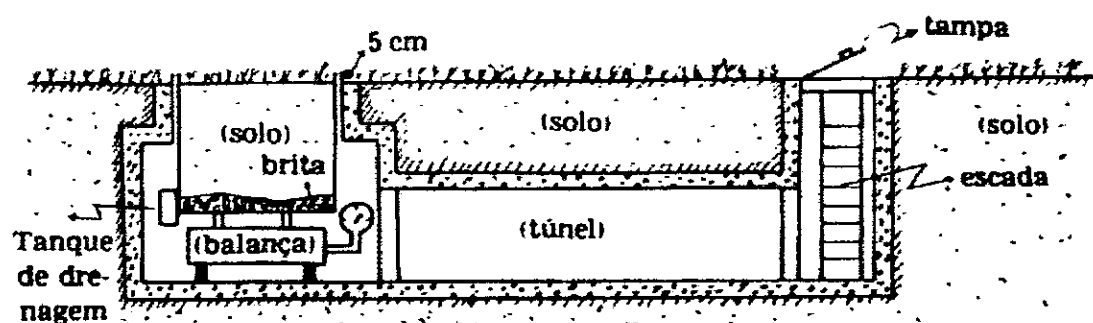


Figura 2.3 Esquema de um Lisímetro de Pesagem Mecânica, onde são vistos o conjunto de tanques, externo e interno, apoiados em uma balança (BERNARDO, 1995).

Em Davis (Califórnia), há um excelente exemplo de lisímetro de pesagem mecânica, construído por PRUITT & ANGUS (1960). O tanque interno tem 6,1 m de diâmetro e 0,9 m de profundidade. Sua precisão é de 0,03 mm, cujos dados de ET são mecanicamente gravados a cada quatro minutos.

A evapotranspiração potencial em um período qualquer entre duas irrigações é dada pela equação:

$$ET_o = \frac{\Delta P}{S} \quad (2)$$

Onde:

ET_o = evapotranspiração potencial de referência, em mm/dia;

ΔP = variação no peso do tanque, em Kg;

S = área do tanque, em m^2 .

2.2.2 Lisímetro Flutuante

É menos preciso do que o lisímetro de pesagem mecânica, porém mais simples e barato de ser construído. Consiste em dois tanques, um dentro do outro, sendo que o interno, com o solo, bolsa de ar para diminuir sua densidade e um tubo para permitir a drenagem por sucção, flutua dentro do tanque externo (Figura 2.4). A variação do peso do tanque interno faz com que varie o nível do líquido no piezômetro de medição. Em geral, usa-se água como líquido sobre o qual flutua o tanque interno, porém, podem-se usar outros líquidos com densidade maior do que a água, como o cloreto de zinco, cuja densidade é 1,9 etc.

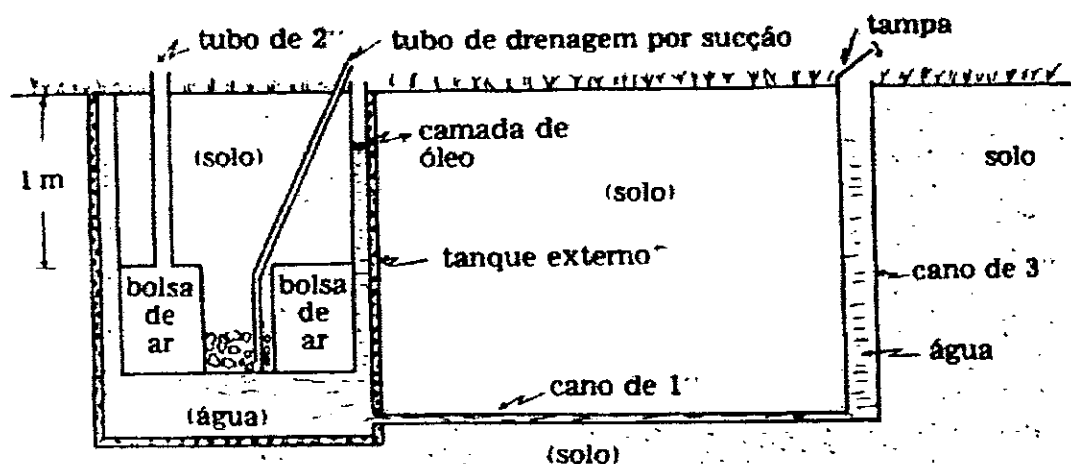


Figura 2.4 Esquema de um Lisímetro Flutuante, onde são vistos um conjunto de tanques, externo e interno, sendo que o interno apresenta bolsas de ar e tubos para permitir drenagem por sucção, flutuando dentro do tanque externo (BERNARDO, 1995).

As bolsas de ar são necessárias para diminuir a densidade do tanque interno e dar - lhe maior estabilidade.

A E_{To} é calculada pela variação do nível do líquido medida no cano de 3" (piezômetro de medição), ou seja, usando equação:

$$E_{To} = F \times (h_1 - h_2) + I \quad (3)$$

Onde:

E_{To} = evapotranspiração potencial de referência, em mm/dia;

F = fator de conversão determinado para cada lisímetro;

$h_1 - h_2$ = variação do nível do líquido no piezômetro de medição, entre dois dias consecutivos, em cm;

I = precipitação ou irrigação ocorrida sobre o lisímetro, entre as duas leituras, em mm.

2.2.3 Lisímetro Hidráulico

Este tipo de lisímetro consiste em dois tanques, um dentro do outro, em que o tanque interno apóia-se sobre câmaras de borracha flexíveis, cheias d'água. As câmaras comunicam-se entre si através de um tubo, também cheio de d'água, e elas comunicam-se com um manômetro, onde se lê a variação de pressão das câmaras, conforme a Figura 2.5:

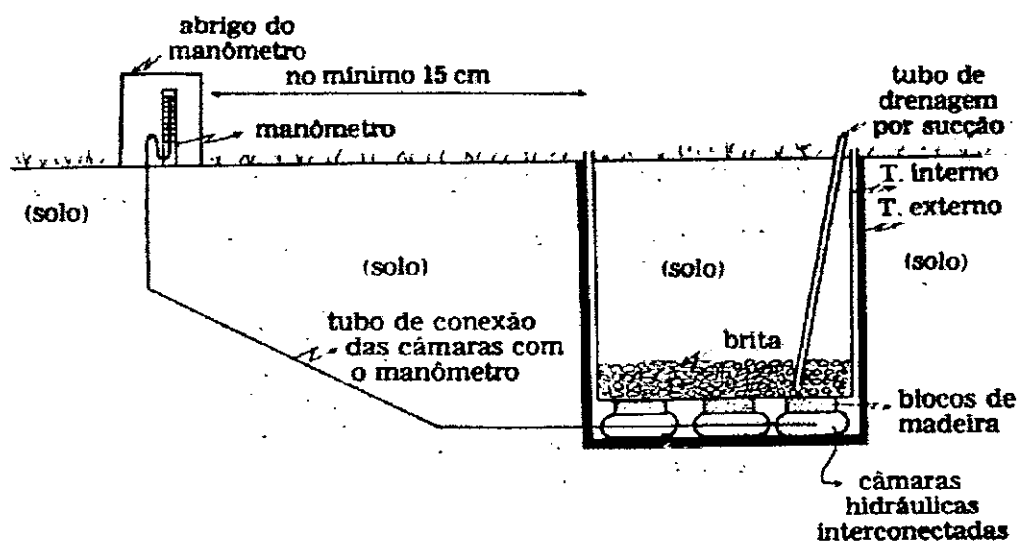


Figura 2.5 Esquema de um Lisímetro Hidráulico, onde são vistos um conjunto de tanques, externo e interno, apoiados sobre câmaras de borracha flexíveis, cheias de água (BERNARDO, 1995).

A E_{To} é calculada pela variação de pressão do manômetro, usando a equação :

$$E_{To} = F \times (h_1 - h_2) + I \quad (4)$$

Onde:

E_{To} = evapotranspiração potencial de referência, em mm/dia;

F = fator de conversão determinado para cada lisímetro;

$h_1 - h_2$ = variação do nível do líquido no manômetro, entre dois dias consecutivos, em mm;

I = precipitação ou irrigação ocorrida sobre o lisímetro, entre as leituras, em mm.

Como o tanque interno se apoia unicamente sobre as câmaras (células hidráulicas), a variação do seu peso é que faz variar a leitura do manômetro.

Devem-se colocar, entre o tanque interno e as câmaras, para evitar que se dilatam, aumentando a área de contato quando o tanque estiver mais pesado (após a irrigação).

Outro erro que pode ocorrer neste tipo de lisímetro é com a dilatação do tubo do manômetro com as câmaras não deve ser feito de ferro, e sim de PVC reforçado, para minimizar a condução de calor.

O lisímetro em sua forma mais simples compreende a medida volumétrica de toda água que sai do sistema, estando o mesmo com ou sem vegetação.

Com relação à instalação de um lisímetro, diversos aspectos devem ser considerados. Assim, sua finalidade, tempo de resposta, verba disponível, dimensões, equipamentos para medições e a precisão que se deseja de medidas são fatores essenciais para definição do tipo e dimensões do lisímetro a ser construído. É importante ainda observar a importância de se utilizar um lisímetro monolítico ou preenchido no local. Sob certos aspectos, os lisímetros monolíticos apresentam uma representatividade maior das condições de campo, embora sua fabricação seja limitada no que se refere às dimensões do mesmo. A colocação de um sistema de drenagem com sucção controlada no fundo, para manter a representatividade das condições de campo, torna o trabalho extremamente laborioso. O lisímetro preenchido no local tem a vantagem de um monitoramento das condições iniciais do solo, afastando-se no início, das condições naturais da região em estudo, por melhor que se tente reproduzi-las.

No que refere às condições de drenagem livre, ou com sucção controlada no fundo do lisímetro, é importante observar que há necessidade de se manter artificialmente uma tensão no fundo do lisímetro, para aproximar as condições de contorno, na mesma profundidade. Sem esta tensão artificial ocorre um efeito de

impedimento da drenagem havendo uma acumulação de água o fundo do lisímetro. O sistema de drenagem livre é de menor custo, fácil de instalar e requer praticamente nenhuma manutenção. Ocorre contudo que não é adequado para lisímetros rasos quando a água acumulada se torna de proporção significativa da água total no solo. Torna-se assim recomendável a instalação de tubos cerâmicos, velas de gesso, aço inoxidável e placas de tensão de acrílico, a serem colocadas na areia e no solo acima e conectadas a um sistema de vácuo com uma coluna pendente para produzir a sucção desejada.

2.3 Descrição dos Mini-Lisímetros

Foram construídos no Laboratório de Pedologia localizado dentro do Departamento de Geografia, no Instituto de Geociências da UFRJ (Figura 2.6), um conjunto de três mini-lisímetros, constituídos de baldes de plástico, com 60,0 cm diâmetro na parte superior e 40,0 cm na parte inferior, na qual foram feitos furos para facilitar a drenagem, e com altura de 50,0 cm.

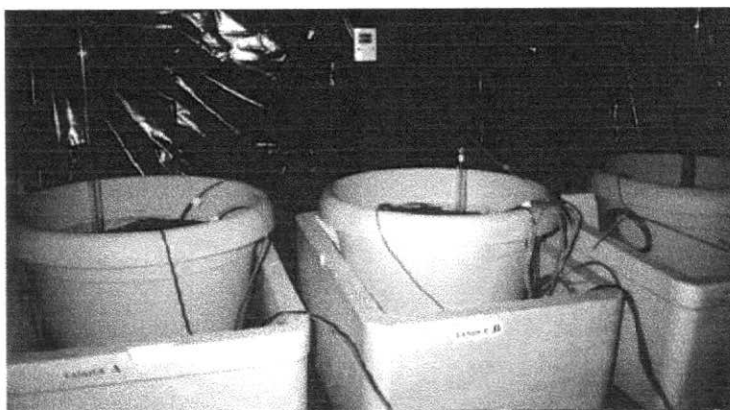


Figura 2.6 Esquema ilustrando o conjunto de mini-lisímetros instalados no laboratório de Pedologia do Instituto de Geociências da UFRJ.

Esses baldes foram colocados dentro de caixas de isopor com capacidade de 120,0 Litros, com dimensões externas de 40,0 cm de altura, 80,0 cm de comprimento e 50,0 cm de largura.

Os baldes ficaram apoiados sob um estrado de madeira, que serviu não só para facilitar a drenagem mas também para distribuir o peso do conjunto solo-brita-balde. Na caixa de isopor foram colocados calços na base, para facilitar o escoamento da água até a captação. Este desnível foi corrigido entre o baldes e a caixa, para impedir o fluxo preferencial no solo, "mascarando" os resultados esperados.

A opção do plástico como material componente destes vasos, segue sugestões apresentadas por EVETT, S. R. *et al.* (1995), onde ensaios realizados com mini-lisímetros em campo, utilizando tanques de plástico comparados a tanques de ferro, para averiguar a transferência de calor de acordo com o tipo de material, evidenciou maior evaporação nos tanques de ferro, motivada pelo aumento da condução de calor em tanques revestidos por esse material. O uso de recipientes constituídos de materiais como argila ou cimento, também não é desejável, pois estes materiais absorvem umidade, afetando a quantificação das variáveis do balanço hídrico. A Figura 2.7

apresenta a representação esquemática dos mini-lisímetros desenvolvidos em laboratório:

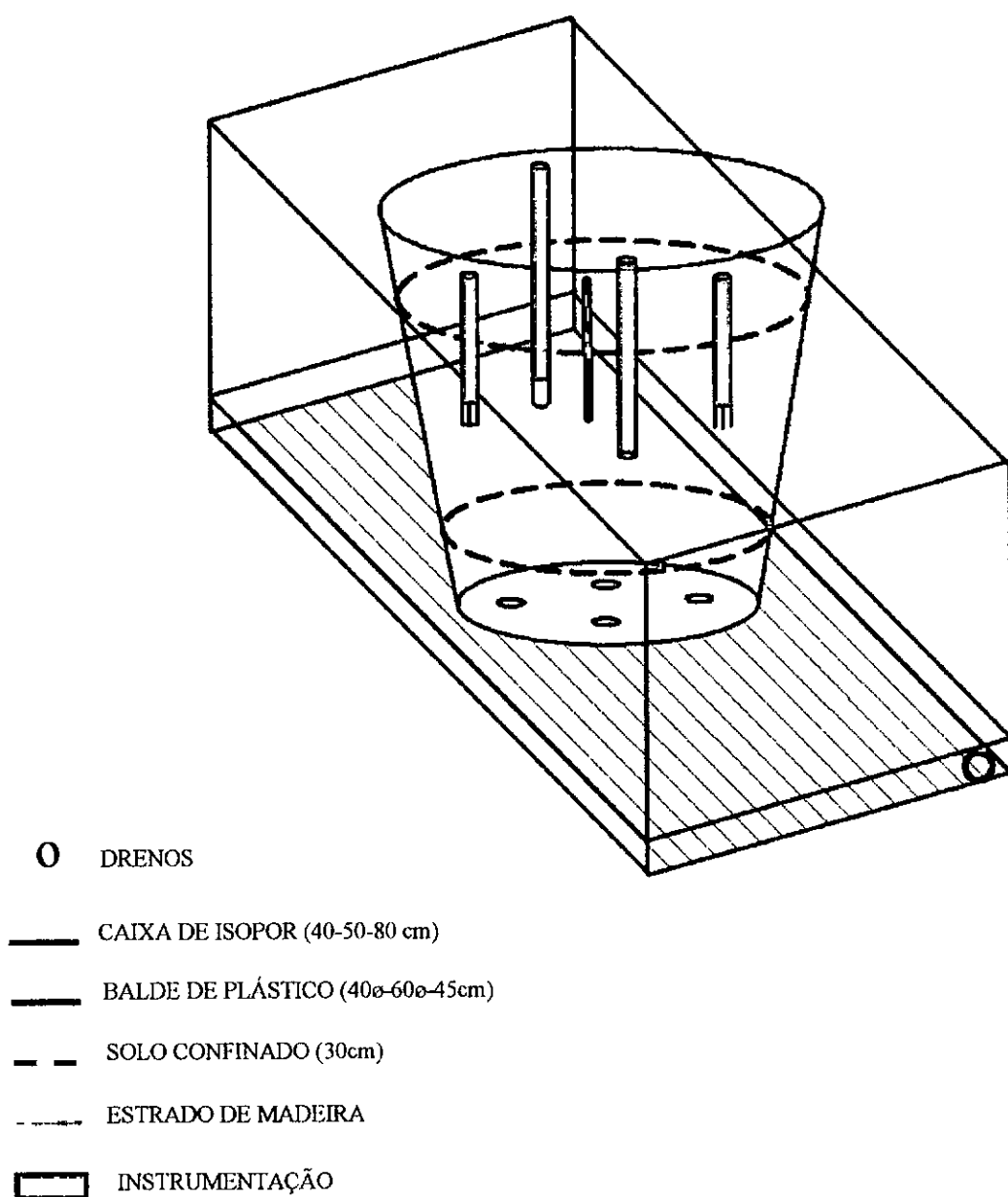


Figura 2.7 Esquema trimensional do mini-lisímetro instalado em laboratório.

3. CONCEITOS GERAIS DO BALANÇO HÍDRICO

Os fluxos de entrada e de saída em um lisímetro podem ser representados pela equação do balanço hídrico, expressa por:

$$P + I \pm R_0 = ET + D \pm \Delta W \quad (5)$$

Onde o fluxo de água que entra no sistema por um dado período de tempo é dado por:

P = precipitação

I = Irrigação

O fluxo de água que sai é dado por:

ET = evapotranspiração, que inclui evaporação do solo e transpiração das plantas

D = percolação profunda ou água de drenagem

R_0 = escoamento superficial (*runoff*), que normalmente as margens salientes do lisímetro impedem que se movimentem para fora ou para dentro do mesmo. Assim sendo, de forma geral no caso geral dos lisímetros, $R_0 = 0$

ΔW = mudança do teor de umidade (W) da massa de solo isolada durante um determinado espaço de tempo

Para determinar a evapotranspiração (ET) todos os termos da equação de balanço hídrico precisam ser medidos de acordo com:

$$ET = P + I - D \pm \Delta W \quad (6)$$

A precipitação (P) e a irrigação (I) podem ser diretamente medidas por métodos convencionais tais como pluviômetros e pluviógrafos.

Arranjos especiais devem ser feitos no lisímetro para drenar e medir a água percolante através da massa de solo (D). Uma câmara de drenagem especial e um *container* calibrado é usado para coletar e medir a água percolada no fundo do *container*.

A variação do teor de umidade da massa de solo (ΔW), que representa uma acumulação de água no solo após a precipitação ou irrigação, ou uma perda de água do solo por evapotranspiração, é de determinação mais difícil.

Em lisímetros de peso, a mudança no peso, corrigida para precipitação, irrigação e drenagem, fornece uma medida direta e acurada da mudança de teor de umidade (ΔW). Os mecanismos complicados e caros de pesagem tornam contudo este procedimento complicado. Apesar disto, a evapotranspiração e componentes de drenagem podem ser medidos simultaneamente e independentemente.

No caso de lisímetros não pesáveis outras formas são empregadas para determinar ΔW como amostragem do solo e medidores de umidade mais modernos, como alguns dos instrumentos aqui apresentado neste trabalho. Estes lisímetros (sem pesagem) nos permitem determinar a evapotranspiração para um dado intervalo de tempo deduzindo a água drenada, coletada do total de água fornecido ao sistema.

Imediatamente após o término da drenagem, a massa de solo apresenta um teor de umidade bem definido, que é assim chamada "capacidade de campo". ΔW torna-se desprezível e a evapotranspiração pode ser determinada diretamente por:

$$ET = P + I - D \quad (7)$$

Os valores da evapotranspiração são assim médias sobre períodos de tempo entre ocorrências de drenagem. Erros na evapotranspiração podem ocorrer devido a algumas diferenças no teor de umidade após a drenagem. Com o auxílio de tensiômetros e medidores de umidade automáticos isto pode ser melhor controlado.

No caso de lisímetros de compensação, onde um nível d'água constante é mantido, a redução de umidade (ΔW) resulta num rebaixamento do nível d'água que é freqüentemente compensado por um equipamento automático. Neste caso as medidas de evapotranspiração podem ser feitas em intervalos de tempo reduzidos.

Em lisímetros de drenagem contínua com irrigação diária, o teor de umidade do solo é mais ou menos constante, de forma que a variação na umidade armazenada é desprezível e $\Delta W = 0$.

A percolação é uma fase importante do ciclo hidrológico que recarrega o lençol freático. O lisímetro permite um monitoramento hidrológico das condições ambientais, possibilitando projetos adequados para a agricultura e estudos de caráter ambiental.

Considera-se, quando necessário, o microclima da região, o estudo e calibração de equipamentos de medidas de umidade e sucção de campo, de forma bastante adequada, e o controle de diversos parâmetros da equação de balanço hídrico.

3.1 Ciclo da Água

Este ciclo deve ser entendido de forma dinâmica, e envolve uma série de outras variáveis climáticas, que em conjunto contribuem para a manutenção da água no sistema.

Ocorre que grande parte da água de precipitação ao atingir a superfície do solo, excede a capacidade de infiltração, e favorece o surgimento do deflúvio superficial pela ação da gravidade. Outra pequena parte da água de precipitação não chega a atingir a superfície do solo, sendo interceptada pela vegetação e evapora.

A Figura 3.1 apresenta esquematicamente uma encosta, representando o ciclo da água em pequena escala.

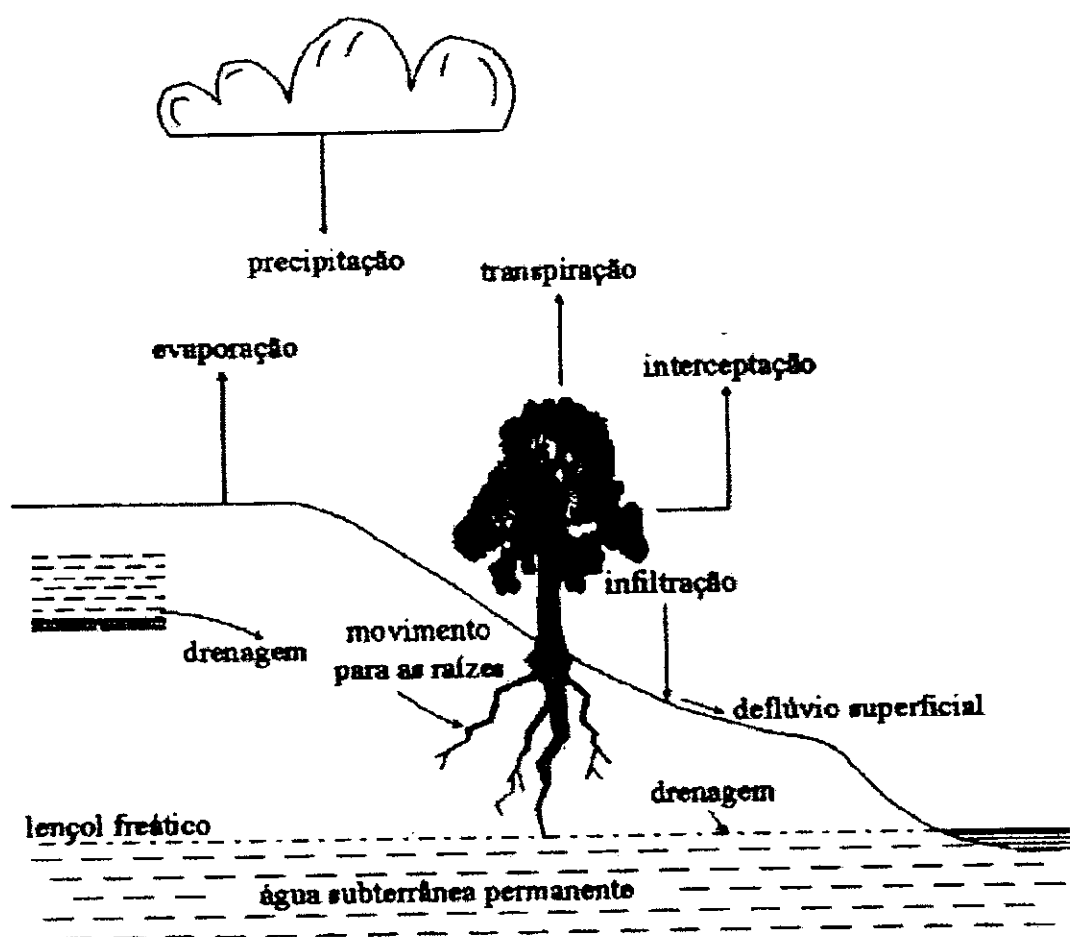


Figura 3.1 Esquema ilustrando o processo do Ciclo da Água em uma Bacia Hidrográfica (LIBARDI, 1995).

Do montante da água que infiltra, uma parte permanece nos poros do solo, confinada pela ação de forças matriciais e outra é absorvida pelas raízes das plantas e

transpirada pelas folhas. O que sobra é percolado mais profundamente, alcançando o lençol freático, abaixo do qual os poros do solo são saturados, e sendo drenada para os rios. Segundo LIBARDI (1995), nas partes mais altas pode haver camadas de solo mais compactadas, o que dificultaria a infiltração da água através do perfil de solo, surgindo veios de água e pequenos córregos para fora da superfície. Em períodos de seca, essa drenagem pode desaparecer completamente.

4. CONCEITOS GERAIS DE FÍSICA DOS SOLOS

4.1 Fases do Solo

Os solos, para os propósitos de física do solo, são encontrados na natureza como sistema trifásico (Figura 4.1), no qual encontram-se partículas de solo e ar, o que constitui um solo seco, enquanto uma que a integração de partículas de solo e água constituem o solo no estado saturado. Entre estes dois extremos têm-se os solos não saturados, os quais constituem de partículas de solo, água e ar em percentagem volumétricas diferentes (FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

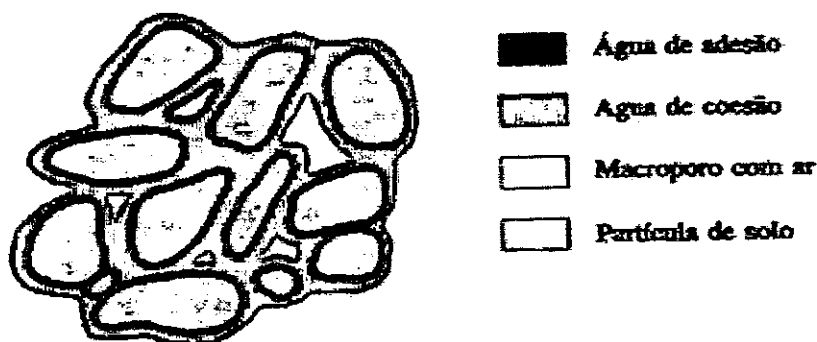


Figura 4.1 Representação esquemática do arranjo entre a água de adesão, a água de coesão, as partículas do material de solo e os macroporos (NASCIMENTO, R.A.M., 1998).

4.1.1 Energia Potencial da Água no Solo

A energia potencial da água no solo corresponde ao estado de energia da água dentro do solo. Para definir este estado, torna-se necessário considerar vários campos de força e não somente o gravitacional. Trata-se de campos de força que são responsáveis pelos fenômenos de tensão superficial, capilaridade, adsorção e etc. Estes fenômenos são resultantes da interação entre as partículas sólidas do solo, organizadas de maneira que formem a estrutura (também chamadas de matriz do solo) e a água. Como é difícil separar todos estes fenômenos para se fazer uma análise detalhada, logo, todos são considerados em conjunto e de sua atuação resulta a energia potencial, designada matricial. Quanto menores os poros e quanto mais "ativas" as partículas sólidas do solo, tanto menor a energia potencial matricial da água a eles associada (REICHARDT, 1987).

A energia potencial da água é comumente chamada de energia potencial total (Ψ) e é composta das seguintes partes:

$$\Psi = \Psi_g + \Psi_p + \Psi_m + \Psi_{os} + \dots (\text{outra formas de energia geralmente desprezíveis}) \quad (8)$$

Onde:

Ψ_g = potencial gravitacional - Este componente do potencial total, tem valor zero no plano de referência, ou seja, na superfície do solo (estado padrão de gravidade), sendo positiva acima e negativa abaixo do mesmo plano. A força gravitacional é a responsável pela drenagem dos solos, atuando na unidade de volume de água, quer seja água do solo, da planta ou da atmosfera, constantemente de cima para baixo, podendo ser contrabalanceada pela ação de outras forças, passando sua atuação a ser inexpressível, e não atuar.

Ψ_p = potencial de pressão - Este componente corresponde à pressão a qual a água está submetida. Deste modo, quanto maior a pressão, maior o estado de energia da água, sendo medida em relação a uma condição padrão (água submetida a pressão atmosférica local), assumindo valor zero. Somente valores acima da pressão atmosférica são considerados nesta componente, sendo estes positivos. Em outras palavras, esta componente só existe em situações onde existe excesso de água (água livre exercendo carga hidráulica sobre solo saturado).

Ψ_m = potencial matricial - Este componente refere-se aos estados de energia da água devidos à sua interação com as partículas do solo, chamadas de matrizes. Esta interação corresponde a fenômenos de capilaridade e adsorção, que dependem do arranjo poroso do solo, conferindo à água estados de energia menores do que o estado de energia da água "livre" à pressão atmosférica. Considerando este último como estado padrão, tendo valor zero, a componente matricial será sempre negativa. Para o solo saturado ($\theta = \theta_s$) o valor de $\Psi_m = 0$. Para um solo seco, Ψ_m pode atingir valores de algumas dezenas de atmosferas (negativo).

Ψ_{os} = potencial osmótico - Este componente refere-se ao estado de energia da água na presença de íons e outros solutos, sendo mais negativa (menor estado de energia da água) quanto mais concentrada a solução do solo se encontrar. Como os solutos se movem junto com a água, esta energia potencial geralmente só é importante, na presença de membranas semi-impermeáveis, que permitem a passagem da água e não dos solutos.

O movimento da água pode ocorrer, toda vez que no sistema considerado houver diferença de potencial total $\Delta\Psi$. Em outras palavras, a água se move do estado de maior energia para o estado de menor energia, mais estável, espontaneamente. Quando ocorre o contrário, ou seja, a passagem da água de um ponto de menor estado de energia para um ponto de maior estado de energia, o potencial da água é negativo, não havendo espontaneidade. Essa diferença de potencial gera um gradiente de potencial, evidenciando o sentido no qual um campo potencial apresenta maior crescimento.

4.1.2 Capilaridade

O contato entre a água e as partículas do solo, presente nos poros, resultado do arranjo entre essas partículas, induz um movimento dinâmico, ascendente, consequência da interação entre as cargas que envolvem as partículas de solo, principalmente na fração argila, e a energia proveniente do arranjo estrutural da água. Este movimento de ascensão é mais expressivo, ou significativo, nos microporos do solo, onde há uma maior interação água-partículas de solo, onde esses microporos funcionam como tubos capilares no solo. O contato da água com as partículas produz meniscos, como ilustrado nas Figuras 4.2, sendo que quanto maior o ângulo α entre o menisco e o tubo capilar, maior é o diâmetro do poro, e menor a capilaridade.

O esquema abaixo ilustra melhor essa interação:

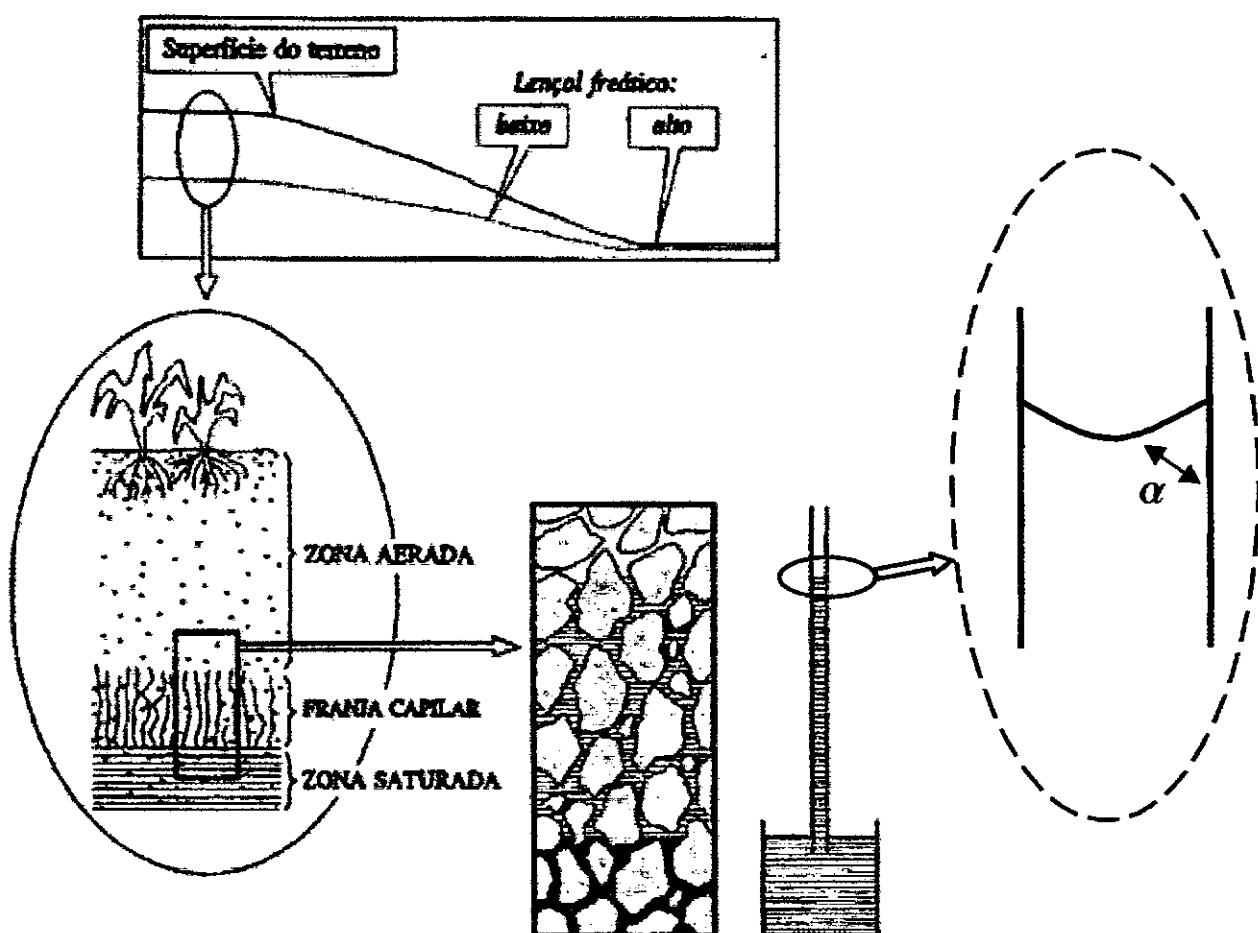


Figura 4.2 Esquema que ilustra a distribuição de água no solo, subdividida em zona aerada, zona saturada e franja capilar, onde é evidenciado o fenômeno da capilaridade. O menisco formado entre a interação da água com as partículas de solo, apresenta um ângulo de curvatura α (NASCIMENTO, R.A.M., 1998).

O fenômeno da capilaridade está associado à sucção matricial, a qual faz parte da componente da sucção total. Desta forma a elevação da água e o raio de curvatura têm implicações diretas na relação entre o conteúdo de água e a sucção matricial nos solos. Esta relação é diferente para situações de maior umidade ou maior drenagem, caracterizando curvaturas diferentes, sendo que essas diferenças podem ser explicadas em termos de capilaridade.

Em situações como períodos de estiagem da precipitação, pode ocorrer um gradiente de potencial negativo, ou seja, a passagem da água de um estado de menor energia para um estado de maior energia. Trata-se de um fluxo de água no sentido de baixo para cima, o que evidencia a ascensão capilar. Esta situação ocorre somente depois que a drenagem profunda cessou e o gradiente matricial passa a ser negativo e de intensidade maior que o gravitacional.

4.1.3 Sucção do Solo

Em linhas gerais, o fenômeno da sucção, corresponde à força em que um elemento poroso absorve água, quando esta encontra-se em estado de energia livre para se mover. A sucção é normalmente expressa por unidades de pressão, sendo que as mais utilizadas são kPa, atm e bars, onde 1 atm corresponde a aproximadamente 100 kPa. No solo os fatores condicionantes no fenômeno da sucção são a fração granulométrica, a densidade e a umidade do solo (FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

4.1.3.1 Sucção Matricial - Representa a sucção equivalente derivada da medição da pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com a água do solo (intersticial), relativa à pressão parcial de vapor d'água em equilíbrio com uma solução de composição idêntica a da água do solo.

A sucção matricial é conhecida por variar com o tempo devido às mudanças ambientais. Qualquer mudança na sucção afeta o equilíbrio global na massa de solo. As diferenças na sucção podem ser causadas por mudanças em uma ou em ambas as componentes da sucção do solo.

4.1.3.2 Sucção Osmótica - Representa a sucção equivalente derivada da medição da pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com a solução de composição idêntica a da água do solo (interticial), relativa à pressão parcial de vapor d'água em equilíbrio com a água pura, "livre".

O papel da sucção osmótica tem sido comumente mais associado com os solos não saturados do que com solos saturados. Entretanto, a sucção osmótica está relacionada ao conteúdo salino da solução do solo, o qual está presente tanto em solos não saturados

quanto em solos saturados. O papel da sucção osmótica é então igualmente aplicável em ambas as condições de solo. Mudanças na sucção osmótica têm um efeito no comportamento de mecânica dos solos, pois se o conteúdo de sal no solo variar, haverá uma mudança global no seu volume e nas cargas elétricas do solo. A sucção osmótica relaciona-se com a difusão da dupla camada em torno das partículas de argila, considerando que a sucção matricial está principalmente associada com a interface água-ar nos poros do solo (FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

4.1.3.3 Sucção Total - Representa a sucção equivalente derivada da medição da pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com a água intersticial, relativa à pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com a água pura "livre". A sucção total é a soma das demais componentes, sucção matricial e sucção osmótica, sendo que normalmente esta última é obtida pela diferença entre as sucções total e matricial, representada esquematicamente pela equação 9:

$$S_t = (u_a - u_w) + s_o \quad (9)$$

Onde:

S_t = Sucção total

$(u_a - u_w)$ = Sucção matricial

u_a = Poro-pressão do ar

u_w = Poro-pressão da água

s_o = Sucção osmótica

5. INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação é uma ferramenta para aquisição de dados edafoclimáticos que tem por objetivo entender os fenômenos envolventes, suas interações com os diferentes ambientes e principalmente seus propósitos.

Do ponto de vista científico, o uso de instrumentação para a determinação dos teores de água do solo podem satisfazer os interesses acadêmicos sobre a dinâmica do fluxo de água e de solutos no solo. Do ponto de vista prático da engenharia, a instrumentação para medida da umidade do solo pode nortear o manejo da irrigação, por exemplo ajudando assegurar a maximização da produção econômica a curto prazo e, a longo prazo, a proteção ambiental (SHOCK, 1998).

Existem muitas classes de instrumentos para o monitoramento da umidade do solo e estes aparelhos servem para muitos propósitos de pesquisa e manejo da irrigação. A água do solo pode ser medida através de instrumentos que medem o teor de água ou a sucção matricial. O teor de água é a quantidade de água por volume de solo ou de peso de solo seco. O potencial de água do solo é a força necessária para remover uma determinada quantidade de água do solo, expressa em kPa, atm, bar, hPa e outras.

O grande desafio da agricultura, além de aumentar a demanda da produção de alimentos, é garantir para gerações futuras, a manutenção dos recursos que dão suporte a essa atividade. Há uma tendência de um novo paradigma para agricultura, implementando tecnologias de ponta no campo de produção agrícola, otimizando o uso destes recursos e ao mesmo tempo garantindo altas produtividades. Além dos conceitos de sustentabilidade e racionalização, esse paradigma incorpora nas técnicas de manejo, conceitos de precisão, o que traz vantagens não só em termos de economia de custos, mas também economia de recursos.

A instrumentação cada vez mais se torna presente e necessária no campo agrícola de produção, seja para automatizar sistemas de irrigação, através do uso de sensores de umidade, como os tensiômetros de cápsulas porosas acoplados em um sistema “timer-válvulas”, ou seja para direcionar o curso de implementos acoplados em tratores, por exemplo, onde Sistemas de Posição Global (GPS), são introduzidos nessas máquinas, alterando suas rotas. O surgimento cada vez mais interativo entre a ferramenta que a informática proporciona e o campo agrícola, através do uso de Sistemas de Informação

Geográfica (GIS) e Sensoriamento Remoto por exemplo, gerenciam esse ambiente de forma racional e ou precisa.

O entendimento do movimento da água no solo é importante na correta administração dos recursos água e solo. Durante a infiltração a água dentro do solo, frequentemente desenvolve um processo definido como frente de molhamento. O conhecimento desta frente de molhamento, é aplicado em muitas áreas da ciência dos solos, sendo que a frente de molhamento pode ser detectada pelas mudanças nas mensurações do conteúdo de água ou através da sucção matricial em um perfil de solo.

Métodos de campo para mensuração do conteúdo de umidade do solo, incluem a moderação de nêutrons, o método gravimétrico (solo desestruturado), os tensiômetros, o papel de filtro, os blocos de gesso e o TDR. As sondas nêutrons, podem traçar no perfil do solo, mensurando na profundidade desejada o conteúdo de água de forma direta. Entretanto, devido à presença de sua fonte radioativa, há uma séria restrição com relação ao seu uso no campo. Além disso, a sonda de nêutron não alcança os primeiros 25 cm de superfície de solo, apresentam dificuldade de calibração, tem alto custo de operacionalização, é indisponível ao uso de *data loggers*, e ainda resultam em riscos de trabalho, expondo o operador à radiação. Desta forma são essas as variáveis que limitam o uso deste equipamento.

Alguns dos instrumentos utilizados neste trabalho, como os tensiômetros e *data logger*, são utilizados em sistemas automatizados de irrigação, afim de determinar o conteúdo de água no solo, armazenando esses dados, interpretando e ativando dispositivos de acordo com a programação específica nos demais componentes envolvidos no processo.

5.1 Métodos Diretos de Determinação da Umidade

A determinação da umidade do solo de forma direta pode ser feita através da umidade contida em uma amostra indeformada de solo, coletada no campo e levada ao laboratório, obtendo-se a umidade gravimétrica da amostra de solo ($U_g\%$), método esse de muita precisão, porém demorado, além de serem necessárias muitas amostras para cada área, ou em campo, instrumentando o perfil de solo *in situ*, fornecendo uma leitura do conteúdo volumétrico de água nos solo m^3 de água por m^3 de solo (θ). A diferença entre essas duas determinações, é que a umidade gravimétrica está relacionada com o peso da amostra (equação 10), e a umidade volumétrica com o volume da amostra (equação 11).

$$U_g\% = \frac{\text{massa da amostra úmida} - \text{massa da amostra seca} \times 100}{\text{Massa da amostra seca}} \quad (10)$$

$$\theta = \frac{\text{volume de água} \times 100}{\text{volume da amostra}} \quad (11)$$

Na umidade gravimétrica o peso da amostra está relacionado com as propriedades constituintes do solo (peso do material), fazendo com que haja uma menor acurácia na determinação da umidade por esse método. Sendo assim, a umidade volumétrica torna-se mais representativa. Para se obter a umidade volumétrica (θ) a partir da umidade gravimétrica (U_g), basta multiplicar-mos U_g pela densidade aparente do solo (ρ_a) demonstrada na equação 12:

$$\theta = \rho_a \cdot U_g \quad (12)$$

5.1.1 Sensor de Umidade - TDR

O Reflectômetro de Domínio de Tempo (TDR) é uma técnica na qual utiliza-se um instrumento acoplado a um sistema de radar, que pode ser bastante eficaz e rápido para investigações do conteúdo de umidade do solo, através de um curto pulso análogo de ondas eletromagnéticas (TOPP *et al.*, 1980). A aplicação da técnica de reflectometria de domínio

de tempo permite monitorar o avanço da infiltração de água no solo em seus diversos estágios, tanto ao longo do tempo quanto ao longo da profundidade. Esta técnica, robusta e não-invasiva, para medições do conteúdo de água do solo *in situ*, é essencial para monitoramento e pesquisas em relação à resposta rápida da dinâmica hidrológica (WEILER *et al.*, 1998). Com o passar dos anos, a técnica do TDR está amplamente difundida em pesquisas, principalmente no campo agrícola (TOPP & DAVIS, 1985; DALTON & GENUCHTEN, 1986) e monitoramento ambiental. Segundo HART *et al.* (1998), o uso do TDR para mensurações instantâneas de solutos, pode ter mérito na avaliação de caráter hidrológico e mecanismos de transporte em outros solos onde o fluxo não é fortemente afetado pelo gradiente de potencial. Além disso, o TDR é utilizado na obtenção de dados para modelagem, atuando na verificação e ensaios de transporte de solutos. A amostragem de água no solo é comumente coletada *in situ*, através do princípio de extração à vácuo, ou seja, tubos conectados a cápsulas porosas inseridas dentro do solo, sendo a cápsula de cerâmica a mais utilizada, entretanto, a adsorção de íons no material cerâmico pode resultar em erros de mensuração na concentração de solutos. O uso de materiais de poros mais inertes, como aço inoxidável, pode minimizar este problema potencial (BAUMGARTNER *et al.*, 1994).

O Reflectômetro de Domínio de Tempo (TDR) é um instrumento que também vem sendo muito bem utilizado para mensurações de umidade de solo na área de engenharia civil, como por exemplo na construção de estradas (BROWN, 1996), de ferrovias, de pistas de aeroportos, de canais e de diques de solo. GARBULEWSKI & ZAKOWICZ (1997) propuseram o uso da técnica do TDR como um método para execução de obras de aterro, mensurando o conteúdo ideal umidade do solo em tempo real, para ensaios de compactação.

O TDR é um instrumento que inclui um gerador de ondas, que libera rapidamente um pulso eletromagnético para um conjunto de “hastes”, através de uma linha protegida paralela ou cabo coaxial. Mudanças no conteúdo médio de água entre as hastes ou na configuração dos “guias de ondas”, causam mudanças na impedância da sonda. Alguns pontos ao longo da sonda em que o pulso encontra uma mudança na impedância, a porção de energia do pulso é refletida, voltando ao longo das hastes para o pulso gerador. A energia que retorna ao gerador de pulso é exibida como função do tempo pela “forma da

onda” no osciloscópio do instrumento. O tempo decorrido entre a reflexão parcial do pulso que atravessa o solo e a reflexão total no final das hastes, pode ser medido em formas de ondas. Para uma sonda de comprimento conhecido, este tempo de percurso é definido como a média da velocidade de propagação da onda ao longo do comprimento da sonda (FERRE *et al.*, 1998). Segundo FELLNER & FELDEGG (1969), a velocidade de propagação é controlada pela passagem dielétrica relativa ao redor da sonda.

CASSEL *et al.* (1994) propuseram uma série de componentes fundamentais para funcionabilidade do instrumento (Figura 5.1); primeiramente, o gerador de sinais emite um pulso de voltagem o qual se propaga ao longo da linha de transmissão a frente do instrumento; o medidor de voltagem, na linha de transmissão do instrumento, seleciona o tempo entre os intervalos. Além disso, há um controlador de tempo, quando é medido a voltagem e quando é enviado o pulso pelo gerador. O computador agrupa esses dados de voltagem em função do tempo, como também as distâncias de reflexões, o qual causam mudanças na voltagem e finalmente, o “display” que é usado para mostrar o padrão da relação tempo-voltagem.

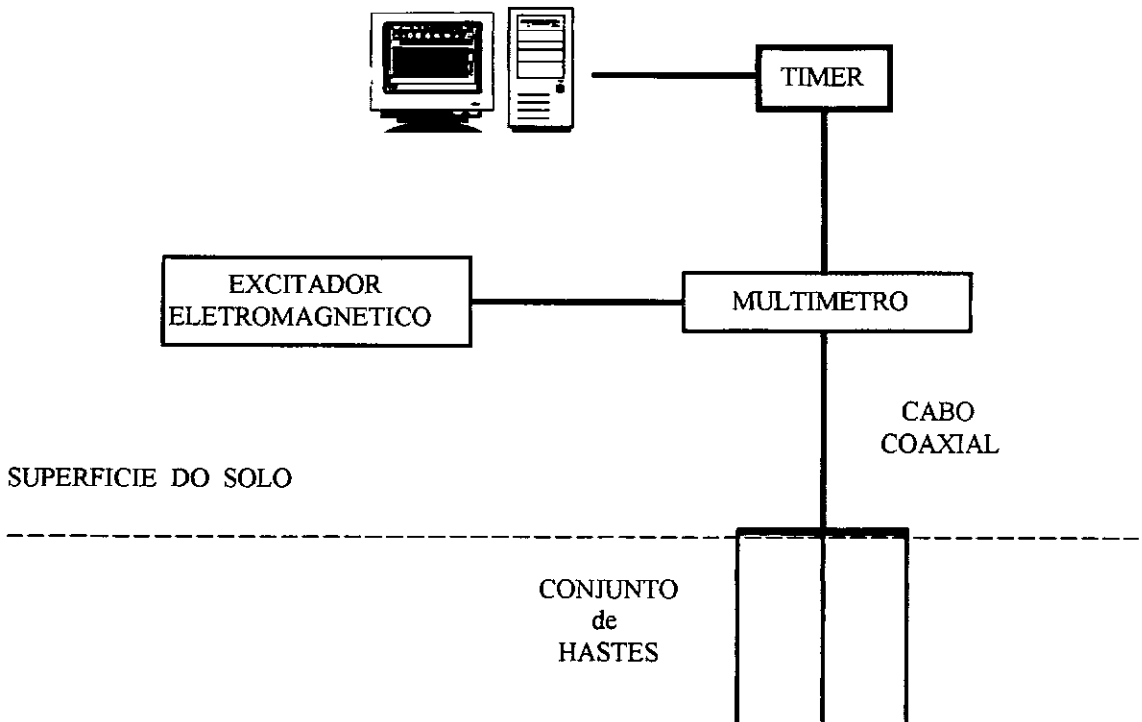


Figura 5.1 Componentes do Reflectômetro de Domínio de Tempo (TDR)

O método da reflectometria do domínio de tempo (TDR) é uma das técnicas recentes que vêm de encontro a necessidade de se estudar as propriedades físicas do solo *in situ*, e vem sendo aplicado tanto para caracterizar a água como também a salinidade do solo. O método foi proposto por TOPP *et al.* (1980) para a aquisição da medida da umidade do solo, utilizando equipamento já existente para diagnosticar descontinuidades em cabos de linha de transmissão de redes telefônicas.

Medindo o tempo de propagação da onda na linha de transmissão e, conseqüentemente, a constante dielétrica (ϵ), TOPP *et al.* (1980) conseguiram correlacionar a umidade do solo com a constante dielétrica (ϵ). A equação (13) descreve a relação da constante dielétrica (ϵ) com o tempo de propagação (t):

$$\epsilon = (c.t / 2.L)^2 \quad (13)$$

Onde:

ϵ = a constante dielétrica do meio

t = tempo de propagação da onda (medido pelo TDR)

L = comprimento da linha de transmissão

c = velocidade da luz aparente no vácuo.

As variáveis que afetam a resposta elétrica no solo são a textura, a estrutura, os sais solúveis, o conteúdo de água, a temperatura, a densidade e a frequência de mensuração (TOPP *et al.*, 1980).

Para verificar a velocidade de propagação do sinal eletromagnético no meio, emprega-se uma linha de transmissão. Esta linha de transmissão, também chamada de sonda, é do tipo coaxial. Em atendimento a estas especificações ZEGELIN *et al.* (1989) desenvolveu a idéia de se utilizar sondas de multihastes dispostas de radial. Logo, em torno de uma haste central são colocadas mais três ou quatro hastes. A aplicação deste tipo de sonda dispensa a necessidade de utilização de “casadores” de impedância, delimita melhor a região de medida, os ruídos e as reflexões.

A região de medida está condicionada ao diâmetro das hastes empregadas na construção da sonda. Quanto menor o diâmetro da haste, tanto menor será a região abrangida pelo sinal, isto é, por consequência, pela decorrência do aumento no espaçamento entre as hastes, sendo este condicionado pelo seu diâmetro. De uma forma genérica pode-se concluir que o espaçamento entre as hastes é aproximadamente 10 vezes o seu diâmetro, sendo que de forma mais exata este espaçamento é condicionado pela impedância do conjunto (CARNEIRO & CONCIANI, 1997).

Além da influência da área da sonda, deve se levar em conta também a região de medida, que se estende desde o início até o final da sonda. Desta forma, uma sonda de 15,0 cm de comprimento instalada na superfície do terreno, fornecerá uma medida da umidade global dos primeiros 15,0 cm do perfil do solo. Consequentemente as medidas são sempre globais (em faixas) e não em um único ponto (CARNEIRO & CONCIANI, 1997). Desejando-se conhecer a umidade em profundidades específicas é preciso instalar sonda exatamente nesta profundidades. Para superar esta dificuldade, TOPP & DAVIS (1985) desenvolveram uma sonda segmentada.

A sonda segmentada consiste em uma linha de transmissão com trechos previamente demarcados com valores distintos de impedância. Isto permite o emprego de uma única sonda para medir o teor de umidade em diversas profundidades de um perfil de solo. Na prática, isto significa construir uma sonda em que as hastes tem trechos com diâmetros diferentes. Estes trechos apresentam um sinal característico e portanto, é possível medir a constante dielétrica somente na região desejada. Uma sonda que emite sinal através de um cabo coaxial tem a vantagem de apresentar a menor perda do sinal na linha e também do lóbulo de irradiação da onda ficar confinado.

Segundo TOPP *et al.* (1980), essa faixa pode variar de 1 MHz a 1 GHz, fora deste alcance, a excitação da frequência é pouco significativa. Nessa faixa há uma forte interação da onda eletromagnética com o movimento vibracional da água. Usualmente a sonda TDR opera sob regime de frequência na faixa de microondas ($\cong 1,2$ GHz). Sendo assim, o tempo de propagação do pulso, medido entre a inserção na linha de transmissão (L.T.) e a reflexão, devido à descontinuidade no fim da L.T., irá variar de acordo com a quantidade de água do meio. A condutividade elétrica é outro parâmetro que pode ser obtido com o TDR, como já discutido.

Existem valores diferentes da constante dielétrica (ϵ) para diferentes materiais. Como por exemplo, para o ar, onde ϵ será igual a 1, enquanto que para um solo seco, ϵ encontra-se entre 2 a 4,5, entretanto para a água, ϵ será igual a 81. Todos esses valores estão condicionados a uma dada frequência e temperatura (no caso a temperatura ambiente). Para medir o conteúdo de água no solo através do TDR, se faz necessária a calibração do sistema. TOPP *et al.* (1980) estabeleceram a equação universal (14) como independente da densidade global. Essa equação permite relacionar a atenuação do sinal (A) em dB, com a leitura do multímetro:

$$A \text{ (dB)} = 20 \log (V_I/V_{ref}) \quad (14)$$

Onde :

V_I = tensão lida, devido à atenuação na amostra (V);

V_{ref} = tensão lida de referência, devido à atenuação do solo seco (V).

Segundo CRESTANA *et al.* (1997), isso nem sempre é verdade, devido ao fato da constante dielétrica ser sensível à presença de materiais magnéticos e de solutos no solo, como é o caso de grande parte dos solos brasileiros, apresentando alta concentração de óxido de ferro . Dessa forma as curvas de calibração umidade - constante dielétrica vão ser afetadas pela textura do solo.

REECE (1998) descreve a determinação da condutividade elétrica (CE) através da sonda TDR, acarreta em possíveis erros causados por se ignorar a resistência em decorrência do comprimento do cabo de prova e conectores da sonda, acabando por comprometer essas leituras de mensuração de soluções salinas presentes no solo, em consequência da interferência que essa resistência pode atuar na determinação deste parâmetro. HEIMOVAARA *et al.* (1995), citado em REECE (1998), propôs que a medida da carga de resistência de um testador de cabo, R_{cabo} , fosse a soma da resistência da amostra a uma combinação da resistência do cabo, dos conectores e dos testador de cabo conforme apresentado na equação (15):

$$R_L = R_S + R_{\text{cabo}} \quad (15)$$

Onde:

R_L = Resistência em função do comprimento do cabo

R_S = Resistência da amostra

R_{cabo} = Resistência do cabo

Então na equação (16) para condutividade elétrica ($\bullet_{\text{TDR}}$) tem-se:

$$\bullet_{\text{TDR}} = K_P / (R_L - R_{\text{cabo}}) \quad (16)$$

Onde:

K_P = Constante da sonda

Em aplicações de campo, o comprimento dos cabos frequentemente é maior que 2,0 m, o qual aumenta a resistência. A adição de supressores transientes conectado ao mecanismo, pode aumentar em 18 Ω (ohms) de resistência ao sistema. Em muitos casos, erros causados omitindo a resistência são maiores na determinação da salinidade. Há uma tendência de sondas de diferentes configurações e construções, apresentarem diferentes resistências internas. Isso evidencia que R_{cabo} é uma função do comprimento do cabo e da constante de resistência da sonda.

A rapidez de resposta do TDR apresenta grande vantagem na obtenção de dados de umidade do solo, e isso vem ajudando a compreender o mecanismo de fluxo no solo. O impulso de dissipação em um fluxo no solo, considerando sua viscosidade, é avaliado pela sonda TDR logo após a infiltração. Segundo GERMANN *et al.* (1997), a quantidade de impulso transferido da superfície até algumas profundidades é proposta como uma medida para quantificar o fluxo de macroporos. Um exemplo de campo demonstrou que 30 % do impulso aplicado na superfície do solo durante a infiltração, é usado para conduzir ao longo de supostos macroporos nos primeiros 30 cm de profundidade, 90 % do impulso que chega

a essa profundidade é usado para avançar fluxo preferencial e somente 10 % é usado para distribuir água adjacente nas partículas mais finas.

TOPP *et al.* (1982 e 1983) propuseram um tamanho para o comprimento da sonda TDR na averiguação da frente de molhamento do solo, através da determinação da reflexão de ondas eletromagnéticas, seria da ordem de • a 30 cm de comprimento, para que não seja dificultada sua inserção no solo. NOBORIO *et al.* (1996) determinou a variação temporal e espacial da frente de molhamento e da infiltração acumulada, através de sondas curtas do TDR, com comprimento • 30 cm, inseridas verticalmente em colunas de solo. Os resultados obtidos foram muito semelhantes aos obtidos por TOPP *et al.* (1982 e 1983). Segundo NISSEN *et al.* (1998a), o pequeno limite do comprimento da sonda TDR é restrito pelo elevado tempo para se enquadrar as ondas eletromagnéticas (EM) refletidas no começo e no final das hastes da sonda. Se o tempo percorrido pelas ondas eletromagnéticas (EM) adquirindo perto ou próximo ao tempo de elevação de reflexão das ondas, é impossível distinguir as causas da reflexão através de mudanças na impedância, no começo e no final da sonda. Usualmente é comum o emprego de componentes da sonda que tenham um grau de tempo de elevação baixo (< 200 ps). Entretanto, os cabos, os conectores, os multiplexadores retransmissores e a própria sonda TDR agem como pequenos filtros, atenuando as altas frequências, aumentando efetivamente o tempo de elevação.

PERSSON & BERNDTSSON (1998) sugerem a utilização da sonda TDR como uma técnica não invasiva de solo, principalmente em locais de clima árido onde o solo apresenta-se bastante duro. A técnica não invasiva é especialmente satisfatória para mensurações da umidade no solo, havendo pouca perturbação nesses pontos de leitura. Nesse contexto, a utilização da sonda TDR vem sendo discutida com muita ênfase na literatura especializada, seja pela sua facilidade de manuseio ou pela sua eficiência na determinação da umidade do solo (ZEGELIN *et al.*, 1989).

Algumas questões, do ponto de vista metodológico, para melhor utilização da técnica estão sendo e deverão ser respondidas, como: novos projetos de "sonda", qualificação do erro de leitura da velocidade de propagação, a influência espacial do lóbulo de irradiação do pulso no meio, a influência da permeabilidade magnética na medida do tempo de propagação, devido à alta concentração de óxido de ferro presente nos óxisolos, e

a essa profundidade é usado para avançar fluxo preferencial e somente 10 % é usado para distribuir água adjacientemente nas partículas mais finas.

TOPP *et al.* (1982 e 1983) propuseram um tamanho para o comprimento da sonda TDR na averiguação da frente de molhamento do solo, através da determinação da reflexão de ondas eletromagnéticas, seria da ordem de $\geq$ a 30 cm de comprimento, para que não seja dificultada sua inserção no solo. NOBORIO *et al.* (1996) determinou a variação temporal e espacial da frente de molhamento e da infiltração acumulada, através de sondas curtas do TDR, com comprimento $\leq$ 30 cm, inseridas verticalmente em colunas de solo. Os resultados obtidos foram muito semelhantes aos obtidos por TOPP *et al.* (1982 e 1983). Segundo NISSEN *et al.* (1998a), o pequeno limite do comprimento da sonda TDR é restrito pelo elevado tempo para se enquadrar as ondas eletromagnéticas (EM) refletidas no começo e no final das hastes da sonda. Se o tempo percorrido pelas ondas eletromagnéticas (EM) adquirindo perto ou próximo ao tempo de elevação de reflexão das ondas, é impossível distinguir as causas da reflexão através de mudanças na impedância, no começo e no final da sonda. Usualmente é comum o emprego de componentes da sonda que tenham um grau de tempo de elevação baixo (< 200 ps). Entretanto, os cabos, os conectores, os multiplexadores retransmissores e a própria sonda TDR agem como pequenos filtros, atenuando as altas frequências, aumentando efetivamente o tempo de elevação.

PERSSON & BERNDTSSON (1998) sugerem a utilização da sonda TDR como uma técnica não invasiva de solo, principalmente em locais de clima árido onde o solo apresenta-se bastante duro. A técnica não invasiva é especialmente satisfatória para mensurações da umidade no solo, havendo pouca perturbação nesses pontos de leitura. Nesse contexto, a utilização da sonda TDR vem sendo discutida com muita ênfase na literatura especializada, seja pela sua facilidade de manuseio ou pela sua eficiência na determinação da umidade do solo (ZEGELIN *et al.*, 1989).

Algumas questões, do ponto de vista metodológico, para melhor utilização da técnica estão sendo e deverão ser respondidas, como: novos projetos de "sonda", qualificação do erro de leitura da velocidade de propagação, a influência espacial do lóbulo de irradiação do pulso no meio, a influência da permeabilidade magnética na medida do tempo de propagação, devido à alta concentração de óxido de ferro presente nos óxisolos, e

a presença de solos expansivos que apresentam rachaduras (ROTH *et al.*, 1992; BAUGARTENER *et al.*, 1994; CASSEL *et al.*, 1994; LARROSA *et al.*, 1995).

A aplicação tradicional, em relação à instalação da sonda TDR, é feita verticalmente na superfície ou enterrada horizontalmente no solo, sendo aferida de acordo com o tipo de calibração a ser adotado. Para posicionamentos verticais da sonda TDR, KANSHANOVSKI *et al.* (1992), propõem não haver necessidade de calibração relativa com os coeficientes de condutividade elétrica do solo (ECa) para a condutividade elétrica da água (EC_w), quando a relação linear entre estas quantidades seja assumido para um determinado conteúdo de água e temperatura. Mas a sonda TDR é freqüentemente instalada horizontalmente quando as informações na variabilidade dos parâmetros de transporte de solutos em perfis de solos heterogêneos, são requeridas (VANCLOOSTER *et al.*, 1993, 1995; WARD *et al.*, 1994; MALLANTS *et al.*, 1994, 1996). De acordo com WARD *et al.* (1994), a calibração pode ser feita através do método direto ou indireto. O método direto relaciona a impedância da sonda TDR para uma conhecida concentração de solutos a vários conteúdos de água, tipicamente feito para solos encapsulados em ensaios separados. No método indireto, existem duas possibilidades: ou se utiliza a calibração dos coeficientes pela equação de impedância com a entrada da concentração dos solutos, ou se utiliza os modelos conceituais como os propostos por RHOADES *et al.*, (1989) e MUALEM & FRIEDMEN (1991). MALLANTS *et al.* (1994), tentou-se utilizar o primeiro método de calibração, usando coeficientes obtidos de uma coluna de solo indeformado em condições de laboratório, constituindo uma etapa conjunta. Porém, o método se torna monótono para solos em ensaios de colunas devido ao fluxo preferencial, desde que relativamente um longo período é requerido para alcançar um equilíbrio entre a introdução da concentração e a impedância da sonda TDR, especialmente em profundidades variadas. O uso deste método em condições de campo encontra mais dificuldades na aplicação contínua de solutos. O problema associado com o método indireto encontra-se em obter um coeficiente de calibração para o pulso de aplicação do soluto, pois a massa aplicada é freqüentemente recuperada nas mensurações do TDR em certas profundidades, desde que a detecção do volume de solo pela sonda TDR, é evitado em solos com macroporos. KIM *et al.* (1998) propôs o método indireto de calibração o mais apropriado para se aplicar em investigações *in situ* pela sonda TDR, posicionada horizontalmente.

Segundo FERRÉ *et al.* (1998), apesar da habilidade de produzir alta resolução do conteúdo de água do perfil, várias limitações da sonda podem comprometer seu uso. Possíveis identificações da reflexão na ponta das hastes, limitam a capacidade das sondas automatizadas de medir o conteúdo de água do solo, na região mais próximos. Identificações para reflexões terminais requerem um mínimo de 20 cm no comprimento das hastes. Além disso, em determinadas sondas, as leituras de mensuração dielétricas de determinadas sondas não correspondem ao conteúdo médio de água ao redor das hastes. Este efeito pode ser minimizado pelo uso de hastes de comprimento menor, em sondas manuais. Finalmente, alta heterogeneidade do solo apresenta dificuldades para instalação das hastes em paralelo, limitando a aplicabilidade da sonda em alguns ambientes, essa limitação ocorre principalmente quando a instalação da sonda é feita verticalmente no perfil do solo, o qual a mensuração do conteúdo de água e a condutividade elétrica são requeridas.

5.1.1.1 Sonda Theta ML2

A sonda *ThetaProbe* ML2 (Delta – T Devices, Cambridge, UK) é um instrumento de origem inglesa que mede diretamente a umidade do solo, correspondendo ao conteúdo de umidade volumétrica, θ_v , através do princípio do domínio de frequência, ou seja, as mudanças na constante dielétrica aparente, são convertidas em uma voltagem direta, virtualmente proporcional ao teor de umidade do solo.

O instrumento consiste de uma “corpo” impermeável, o qual contém componentes eletrônicos, apresentando em sua extremidade um conjunto de hastes de 6,0 cm de comprimento, afiadas de aço inoxidável, que são introduzida no solo. As Figuras 5.2 apresenta um esquema da sonda TDR automatizada, com respectivas dimensões do instrumento em mm:

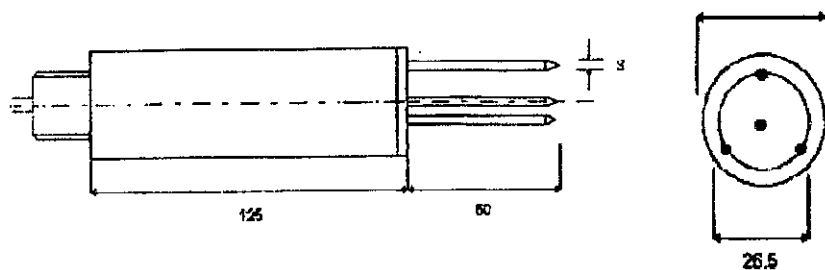


Figura 5.2 Representação esquemática da Sonda Theta ML2 (Delta-T Devices, UK, 2000)

O cabo conectado ao corpo do instrumento, fornece energia provida da fonte externa de alimentação e resgata os sinais analógicos de saída. Estes sinais analógicos de saída, produzidos pela sonda, medem a umidade das propriedades solo em diferentes termos de voltagem. A sonda Theta ML2 é apresentada na Figura 5.3:

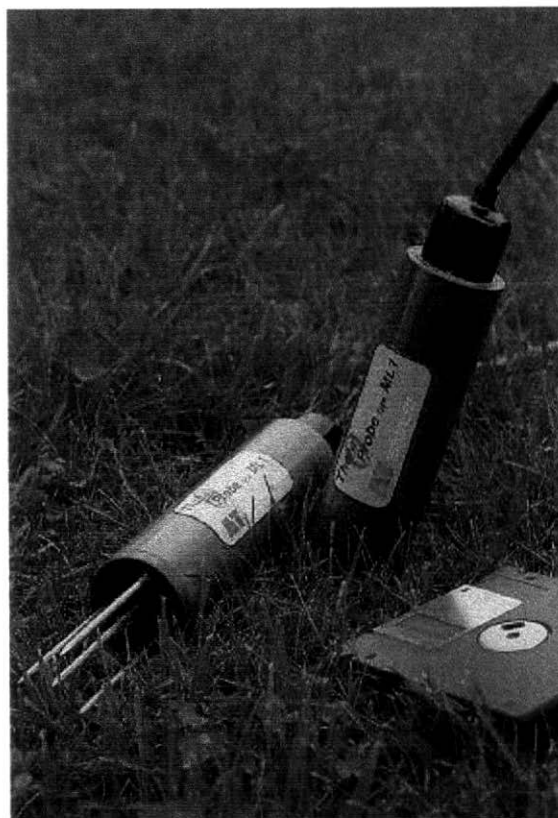


Figura 5.3 Sonda Theta ML2 (Delta – T Devices, UK, 2000).

O conteúdo de umidade volumétrica do solo é a razão entre o volume de água presente e o volume total da amostra. Estes parâmetros são adimensionais expressos em porcentagem (% vol), ou em razão ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^3$). Além disso, $0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^3$ corresponde ao solo completamente seco e $1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^3$ como sendo estado de saturação do solo. Existem diferenças importantes entre o conteúdo volumétrico e o gravimétrico da umidade do solo.

As medições feitas pela sonda dos parâmetros de solo, são realizadas aplicando um sinal de 100 MHz via uma linha especial de transmissão o qual ocorrem mudanças em sua impedância, assim como mudanças na impedância do solo. Esta impedância tem dois componentes; a constante dielétrica aparente e a condutividade iônica. O sinal de

freqüência tem sido escolhido para minimizar os efeitos da condutividade iônica; então mudanças na linha de transmissão de impedância, são dependentes quase que unicamente a constante dielétrica aparente do solo. Estas mudanças causam uma estagnação das ondas de voltagem emitidas, no qual aumentam ou reduzem a voltagem emitidas através das hastes. A diferença entre a voltagem produzida pelo oscilador e a refletida pelas hastes, é usada pela sonda para medir a constante dielétrica aparente do solo.

As aplicações da sonda *Theta* ML2, abrange um amplo campo em diversas áreas, que inclui estudos de irrigação, hidrologia, estabilidade de solos, perfil de água no solo, monitoramento de contaminantes de solo, assim como outros. O sinal de 100 MHz emitido pela sonda, garante maior versatilidade de operação em diferentes situações de ambiente, pois sinais abaixo de 30 MHz, limitam o uso da sonda devido aos efeitos da salinidade, enquanto que em freqüências acima de 250 MHz, acabam por limitar seu uso em solos de textura mais argilosa. O comprimento do cabo também é um fator que pode limitar as leituras da sonda. As recomendações do fabricante são de que este comprimento não seja superior a 100 m de cabo, para não ocorrência de erros na fonte.

5.2 Métodos Indiretos de Determinação da Umidade

A água do solo pode ser medida, também, através de instrumentos que medem a sucção matricial do solo, e a partir desse parâmetro, determina-se a umidade do mesmo. Em outras palavras, esses instrumentos medem propriedades que estão relacionadas com o conteúdo de água do solo. A sucção matricial do solo é a força necessária para remover uma determinada quantidade de água do solo, e é expressa principalmente em unidades de pressão (kPa, atm, bar, hPa, etc).

5.2.1 Tensiômetros - Princípios de Funcionamento

Conforme citado em FLEMING (1993), no início dos anos 20, foram desenvolvidos os primeiros instrumentos, que tinham por finalidade a mensuração da tensão capilar no solo, que foram inicialmente denominados de potenciômetros capilares. Outras denominações foram empregadas com higrômetros (HECK, 1934) e medidor de umidade do solo (ROGERS, 1935). A denominação atual foi estabelecida em estudos feitos por RICHARDS & GARDNER (1936), denominando estes instrumentos de tensiômetro, que passou desde então a descrever corretamente o instrumento.

O tensiômetro consiste em um tubo fechado em sua parte superior, que tem em sua extremidade inferior uma cápsula de cerâmica porosa, mais modernamente com alta pressão de borbulhamento para evitar a entrada de ar, em contato com a matriz do solo. Uma ligação hidráulica entre a água do solo e a água do tensiômetro, através do contato entre a cápsula porosa e o solo é estabelecida. O potencial matricial do solo é transmitido através dos poros da cerâmica para a água no tensiômetro. Na outra extremidade do tensiômetro, a sucção é caracterizada através de um manômetro ou um sistema eletrônico, no caso dos modelos automatizados. Vale observar ainda, que geralmente o domínio de leituras do tensiômetro não ultrapassava -70 a -80 kPa devido a problemas de cavitação do sistema. Mais recentemente, através de experimentos realizados em laboratório do Imperial Colledge, segundo RIDLEY & BURLAND (1993), este limite de medidas de sucção do solo passou a ser superado. Tais autores conseguiram medir em laboratório sucções no solo de até -1500 kPa. O trabalho se apoiou em uma observação de TAYLOR (1979) que demonstrou teoricamente que a resistência à tração da água é por volta de -500 kPa

(RIDLEY & BURLAND, 1993). Segundo os autores, na prática, pequenas quantidades de gás dissolvido removem a nucleação das cavidades a pressões muito maiores. Ainda segundo os mesmos, usando um transdutor de pressão miniatura e mantendo-se o volume de água entre a face ativa do transdutor e a pedra porosa a um mínimo de umidade, tem-se a possibilidade de medir diretamente a sucção do solo até -1500 kPa com um tempo de resposta em minutos. Reduzindo-se o volume de água e usando uma membrana sobre a superfície da pedra porosa é, segundo os autores, possível estender ainda mais o domínio de sucções medidas. MARINHO & CHANDLER (1995) apontam que o uso de um volume pequeno de água no sistema de medição de sucção é o caminho mais fácil de evitar a cavitação. Frisam entretanto, que o volume mínimo possível está limitado pelo deslocamento do diafragma do transdutor. A cavitação não ocorrerá se o sistema estiver livre de núcleos de cavitação, o que compreende, de forma resumida o uso de água desaerada, superfícies extremamente lisas, puras e limpas, sistema evacuado, com aplicação cíclica de pressões para evitar pressões positivas e negativas e pré-pressurização do sistema a altas pressões para dissolver o ar livre. Posteriormente, GUAN & FREDLUND (1996) apresentaram um sistema semelhante para medir sucções elevadas no solo com o qual foram medidas em laboratório sucções de até -1000 kPa. Utilizaram uma pedra porosa de alta pressão de borbulhamento de 15 bar ou -1500 kPa e um transdutor de alta pressão. De acordo com a observação feita por RIDLEY & BURLAND (1993), estes desenvolvimentos em breve estarão incorporados aos tensiômetros de campo, possibilitando a leitura de sucções bem maiores do que -80 kPa. Vale observar que para finalidades práticas da agricultura, os tensiômetros são instrumentos extremamente importantes, seja no que concerne a alimentação das plantas, infiltração e regulagem do fluxo das águas naturais e servidas.

Um tensiômetro manual consiste em uma cápsula porosa, geralmente de cerâmica, conectada a um tubo de plástico, geralmente de PVC (polivinil clorídrico), preenchido com água desaerada e conectado através de uma mangueira na parte superior do corpo do instrumento a um manômetro, em geral de mercúrio. A cápsula porosa é necessária para assegurar uma película de água contínua do solo ao tensiômetro. Ao se colocar a cápsula de cerâmica, a água do seu interior entra em contato com a solução do solo e tende a entrar em equilíbrio. Como a água do solo geralmente encontra-se sob pressão subatmosférica, ela

exerce uma sucção que puxa a água do tensiômetro, que está à pressão atmosférica, diminuindo sua pressão hidrostática. A pressão reduzida no interior do tensiômetro, causando o fluxo de água do interior do instrumento para o solo. Assim, as variações de pressão resultantes do processo de recarga e de drenagem do solo são indicadas pela altura do mercúrio no manômetro.

O fator de correção da depressão capilar em cm H_2O é dada pela expressão $Q = 11,8 / D$, onde D é o diâmetro interno do tubo de nylon, o qual neste caso será de 1,5 mm, fazendo $Q = 7,86$. Uma vez instalado no solo, a pedra porosa de tensiômetro entra em contato com este e a água em seu entorno, o equilíbrio se estabelece e a diferença de pressão é indicada pelo manômetro, composto de um tubo em “U” com água e mercúrio conforme demonstrado nas Figuras 5.4 e 5.5, para a mensuração em apenas um ponto e em todo um perfil de solo, respectivamente.

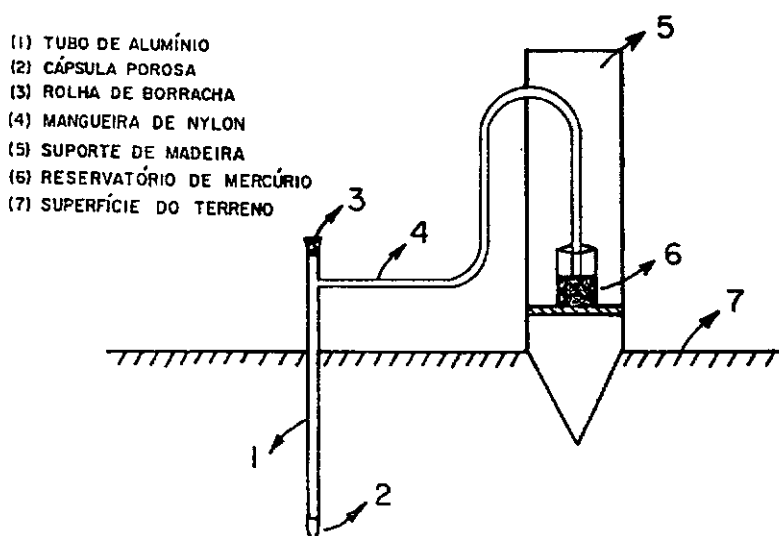


Figura 5.4 Representação esquemática de um tensiômetro manual de manômetro de mercúrio (FERNANDES *et al.*, 1989).

Conforme mencionado anteriormente, o tensiômetro indica as variações do potencial matricial pela elevação e queda da coluna de mercúrio. O cálculo do potencial matricial pode ser assim resumido, segundo NAYSMITH (1979), citado por TORRE NETO (1995), é apresentado pelas equações 17 e 18:

$$\Psi_m = H - 12,6h - Q \quad (17)$$

$$\Psi_h = \Psi_m - D \quad (18)$$

Onde:

Ψ_m = potencial matricial

Ψ_h = potencial hidráulico

H = distância do topo do reservatório de mercúrio à capsula porosa em cm

h = altura da coluna de mercúrio

D = profundidade, a partir da superfície do solo

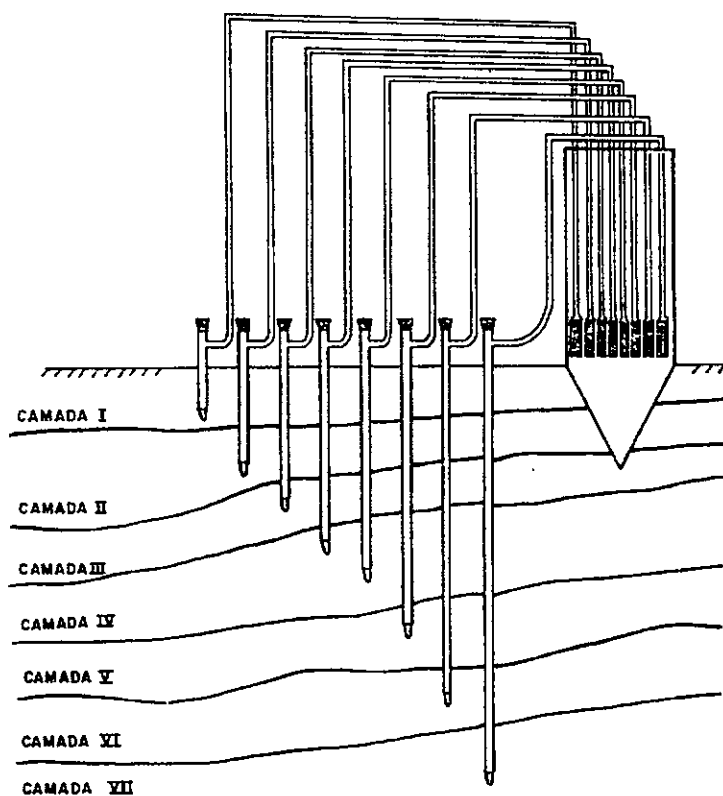


Figura 5.5 Esquema da distribuição de tensiômetros no perfil de solo (FERNANDES *et al.*, 1989).

A faixa do potencial matricial que pode ser medida pelo tensiômetro manual de manômetro de mercúrio, e até mesmo os automatizados, é geralmente limitada a valores abaixo de uma atmosfera. Isto acontece porque a cerâmica é permeável e porosa; a sucção muito alta causa entrada de ar na cápsula igualando a pressão interna à atmosférica. A

sucção do solo continuará a crescer, sob estas condições, entretanto não será medida pelo tensiômetro, segundo HILLEL (1982).

Os tensiômetros geralmente operam abaixo do potencial hídrico, dentro e fora da cápsula de cerâmica, tendendo ao equilíbrio de cápsula pelo fluxo de água, fato que é desprezível durante as mensurações (TIMLIN & PACHEPSKY, 1998). Suponha entretanto, que as pressões que perturbam o equilíbrio dentro e fora da cápsula, não sejam iguais. A água fluirá através da cápsula, como já visto anteriormente. A pressão dentro do tubo pode-se fazer menor que a pressão atmosférica, aplicando um vácuo. A diferença de pressão causará um fluxo de água do solo para o tensiômetro. A barreira proporcionada pela cápsula de cerâmica, selará o interior do tensiômetro da atmosfera, contanto que a magnitude da sucção não seja maior que o ar dentro da cápsula. TIMLIN & PACHEPSKY (1998), observaram durante seus ensaios de mensuração da condutividade hidráulica na zona não saturada, através de tensiômetros manuais, obtiveram dados de influxo durante o processo de drenagem. Vários fatores como, diferenças de escala efetiva e anisotropia, bem como partículas finas entupindo os poros da cápsula, podem explicar tal fenômeno.

5.2.2 Tensiômetros Automatizados

Modernamente os tensiômetros podem ser extremamente refinados, com o uso de sistemas automáticos de aquisição de dados (SCHMIDT, 1993), ou até mesmo simples e econômicos de grande valor prático (FERNANDES *et al.*, 1989), que consiste em um tensiômetro de manômetro de mercúrio. Na Alemanha, por exemplo, a utilização do mercúrio é fortemente criticada tendo em vista seu caráter venenoso causando problemas de contaminação no solo. Seu uso abrange as mais variadas áreas da ciência, atuando em estudos de manejo de irrigação, estudos de recarga hidráulica, monitoramento de aterros de lixo e estudos de engenharia.

Diversos tensiômetros podem ser usados para determinar o gradiente hidráulico e a direção do movimento de água em um perfil de solo. O gradiente hidráulico é usado para estimar o fluxo de água através da condutividade hidráulica na zona não saturada. Os tensiômetros trabalham com o alcance do potencial da água associada à alta condutividade hidráulica da zona não saturada, evidenciando o maior potencial do movimento de água.

Os tensiômetros podem ser construídos com o transdutor de pressão conectado à parte superior externa, permitindo coletar dados automaticamente. Tensiômetros automatizados mais comuns, geralmente são instalados a poucos centímetros no interior do solo, abaixo da superfície, porque o comprimento da coluna d'água que envolve o transdutor de pressão conectado à cápsula porosa, cria um vácuo no interior do tensiômetro. O inconveniente deste aparato, é que ele não permite a calibração periódica do transdutor e reabastecimento do instrumento, a menos que haja acesso físico do operador ao transdutor de pressão. Outro problema com estes tensiômetros, é que a frequência do sinal eletrônico exibida durante o dia, apresenta flutuações significativas comprometendo as mensurações do potencial matricial, resultado das mudanças de temperatura do material componente do tensiômetro e do sistema transdutor de pressão (WATSON & JACKSON, 1967) e da entrada de ar através das cápsulas (CASSEL & KLUTE, 1986). Essas flutuações diurnas, limitam em parte o uso destes instrumentos inseridos na parte rasa do solo. A influência da temperatura sobre os tensiômetros manuais de mercúrio, é bastante significativa, conforme descrito por LOWERY *et al.* (1986). Estes realizaram também, ensaios em campo utilizando tensiômetros com transdutores de pressão, evidenciando pouco efeito da temperatura, na faixa de 10 a 30° C, porém, o efeito da temperatura sobre os tensiômetros também pode proporcionar bolhas de ar no interior das cápsulas porosas. As mudanças causadas pelas bolhas de ar são corrigidas pelo fluxo de água através dos poros da cápsula porosa, apresentando pequenos erros de interpretação das leituras destes instrumentos. BUTTERS & CARDON (1998) evidenciaram resultados práticos e teóricos, com relação aos efeitos da temperatura, reduzidos pela manutenção do fluxo de água para o tensiômetro, isto é, minimizando o volume de bolhas de ar, e maximizando a condutância da cápsula. No campo, tensiômetros isolados mostraram-se pouco influenciados pela temperatura em sua leituras.

Existe uma grande discussão entre a localização do transdutor de pressão no tensiômetro, onde de um lado, os instrumentos acoplados com este mecanismo na parte acima do solo, limitam sua inserção a profundidades maiores, além de favorecer o surgimento de vácuo no interior do tubo pela presença de colunas d'água, enquanto instrumentos com o mecanismo de transdução acoplado na parte inferior, próximo da ponta, evitam essas limitações, além de permitir a aquisição de dados automatizados, porém,

dificultaram o processo de calibração, de substituição e de manutenção do transdutor. HUBBELL & SISSON (1996), desenvolveram dois tensiômetros portáteis automatizados, um equipado com uma agulha hipodérmica conectada ao transdutor de pressão, e o outro equipado com um transdutor de pressão eletrônico. Os instrumentos foram instalados no campo, fazendo leituras durante um período de 6 meses contínuos, dispondo de pouca manutenção durante os ensaios. A maior limitação detectada por estes instrumentos portáteis foram em relação ao tempo de resposta, que apresentou-se mais lento do que as leituras fornecidas por tensiômetros automatizados convencionais, em consequência do pequeno contato entre a cápsula porosa e as partículas do solo, devendo ser removido para a superfície para consertos e calibração. A solução encontrada por HUBBELL & SISSON (1998), foi dividir o tensiômetro em duas partes distintas. A primeira instalada permanentemente no solo, corresponde a parte externa, apresentando um tubo reservatório de água e uma cápsula porosa ao fundo do tubo, e a segunda, consistindo de um transdutor de pressão preso a uma “cortiça” por um conector, montado no fundo, consistindo da parte removível. Deste modo este tipo de tensiômetro apresentou-se bastante versátil, sendo colocado em prática durante 3 meses consecutivos, a uma profundidade de até 4,8 m.

Os tensiômetros automatizados desenvolvidos na Alemanha possuem uma membrana transdutora de pressão acoplada ao corpo do instrumento. Este dispositivo é baseado no princípio de “efeito piezoresistivo” dos semicondutores de silicone, o qual alteram a resistência elétrica específica na deformação, e são processados para sinais definidos via ponte fibrosa. A deformação é causada pela pressão (tensão de água) no *chip* de silicone, o qual é muito fino e extremamente sensível as variações de pressão (UMS-UmbH, 2000).

FLEMING (1993) desenvolveu um tensiômetro que compreende um sistema de aquisição automática de dados. De acordo com autor, o formato tronco-cônico da cápsula porosa foi desenvolvido por BISHOP *et al.* (1960), onde o sistema compreende uma cápsula porosa, uma haste metálica, tampão de base, tampão do topo, conexões de entrada e saída de água, conexão de ligação do sensor eletrônico, sensor eletrônico, tubo plástico tipo “saran”, mangueira plástica “crista” e tubo de PVC rígido.

5.2.2.1 Tensiômetro Utilizado no Trabalho

O tensiômetro automatizado nesse trabalho é do tipo UMS T4A (UMS GmbH - Munich, Germany) podendo ser usado em uma ampla variedade de aplicações. Seu alcance de leitura do potencial matricial, varia de +100 a -85 kPa. O transdutor de pressão localiza-se na parte inferior, próximo à cápsula porosa, tendo alta resolução nas mensurações contínuas da tensão da água no solo.

Após certos períodos de estiagem de precipitação, quando o potencial matricial atinge sucções acima de -80 kPa, o tensiômetro T4A requer a reposição de água desaerada no interior da cápsula porosa. Sua limitação de temperatura varia de 0 a + 50° C, sem maiores danos no sistema de transmissão (membrana transdutora). Sua grande qualificação, é rapidez de resposta e amplo alcance de pressão de equilíbrio, em torno de 60 kPa/h. O tensiômetro automatizado T4A é apresentado na Figura 5.6:

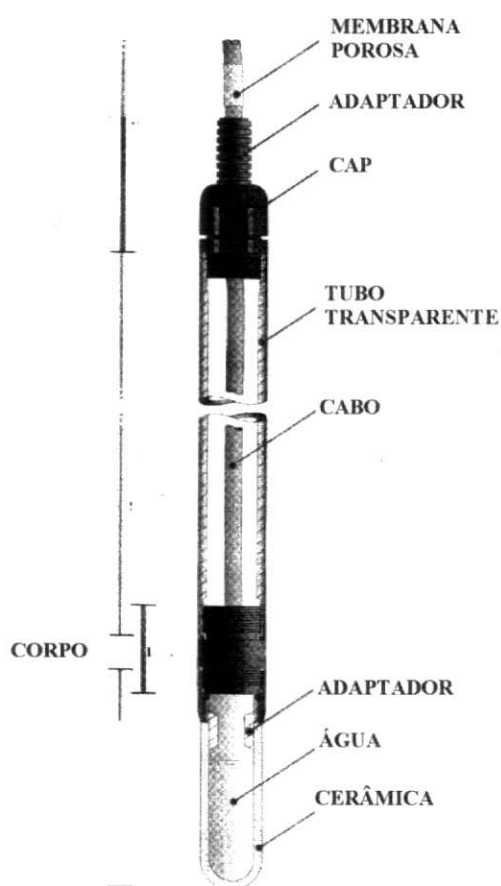


Figura 5.6 Tensiômetro automatizado T4A, desenvolvido na Alemanha (UMS-GmbH, DE, 2000).

A tensão da água medida é convertida pela membrana transdutora, em sinais elétricos (mV) contínuos definidos. Estes sinais pode ser mensurados pela utilização de um voltímetro e fonte de alimentação ou transmitidos a qualquer *data logger*, registrando e armazenando esses sinais automaticamente.

5.2.2.2 Tensiômetro de Equivalência (Equitensiômetro)

O Tensiômetro de Equivalência ou Equitensiômetro EQ2, compreende uma sonda *Theta* comum (Delta-T Devices, Cambridge, UK) e um corpo de equilíbrio, conforme a Figura 5.7 O EQ2 faz uso inteligente da mais recente geração de sensores de umidade, para derivar com precisão as leituras sem os problemas muito comuns aos tensiômetros. O sensor consiste da sonda *Theta* embutida em um material poroso especialmente formulado. O conteúdo de água deste material alcança equilíbrio com o potencial matricial do solo envolvido, onde é detectada pela sonda *Theta*, quando absorvida. Seu princípio de funcionamento baseia-se como o próprio nome indica, que o potencial matricial entre o material do solo e o corpo do instrumento se encontram em equilíbrio.



Figura 5.7 Tensiômetro de Equivalência – Equitensiômetro EQ2 (Delta – T Devices, UK, 2000).

Através da determinação do potencial matricial no corpo em equilíbrio pode ser fornecido o potencial matricial do solo. Em primeiro instante a resposta do instrumento EQ2 corresponde a uma faixa de 0 a -10000 hPa ou -1000 kPa (10 atm), sendo que sua melhor precisão, varia de -100 kPa a -1000 kPa, com $\pm 5\%$ de erro. A precisão de leitura do EQ2 em sucções entre 0 e -100 kPa, é de ± 10 kPa. Com o crescimento do domínio de medição, sua utilização pode ser limitada conforme cada caso em questão. A Figura 5.8

apresenta alguns pontos de calibração do Equitensiômetro são que foram produzidos individualmente. No domínio de 0 até -500 hPa a calibração foi feita com um tensiômetro de pressão e no domínio abaixo de -500 hPa, a calibração foi feita com o sistema pF, que corresponde a unidade de medida de pressão (curva característica de retenção de umidade do solo em questão).

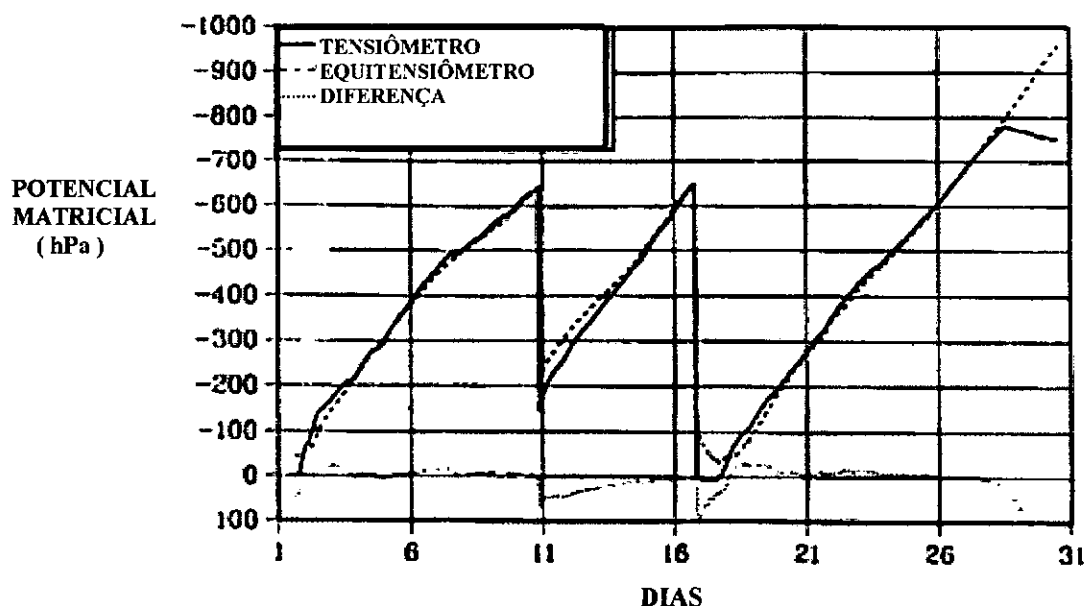


Figura 5.8 Calibração Equitensiômetro EQ 2 –Tensiômetro (UP – GmbH, DE, 2000).

Com base no princípio de medição pouco perturbável a precisão das medidas do EQ2 fica abaixo dos domínios de equipamentos comparáveis (psicrômetros e curva pF) em combinação com sondas *Theta*. No domínio úmido com sucções abaixo de -1000 hPa), os valores do EQ2 “batem” com aqueles de tensiômetro de pressão (valores convergentes).

O EQ2 é uma sonda de medição capacitiva e mede apenas com correção, quando o equilíbrio no interior do corpo ocorre. No decorrer do tempo de equilíbrio, as leituras do potencial no solo, podem ser alteradas pela histerese. Quanto menor o potencial matricial e mais rápida a alteração, tanto menor é o efeito da histerese (Tabela 5.1). Como na natureza a velocidade de mudança do potencial matricial de forma geral é menor de que 0,1 hPa/min, o efeito de histerese no EQ2 na utilização prática está bastante abaixo desses valores. Isto confirma também a proximidade de valores medidos com o tensiômetro de pressão observados no Figura 5.8. Assim, tanto, na molhagem quanto na secagem, uma

variação do Equitensiômetro com relação ao tensiômetro de pressão pode não ser praticamente reconhecida.

Segundo o manual de fábrica, a influência das características físicas e químicas do solo sobre os resultados medidos, como teor de húmus, estrutura do solo, granulometria, densidade, pH, parecem não ter influências nas medições. Devido ao fato do EQ2 ser um instrumento produzido recentemente, muito trabalho de investigação científica deve ser realizada para apurar esses dados. Porém sabendo-se que o princípio de funcionamento do EQ2 é basicamente semelhante ao da sonda *Theta*, essas limitações com relação a sua utilização, podem ser previamente consideradas.

Tabela 5.1 Efeito da histerese no Equitensiômetro EQ2 (UP – GmbH, DE, 2000).

Potencial Matricial Mudança Absoluta		Erro na medição em hPa por minutos							
hPa	hPa/min	0	10	30	60	120	180	300	360
-985	-1,1	22	3	0	0	0	0	0	0
-2148	-1,5	56	53	26	0	0	0	0	0
-3761	-3,7	202	191	180	162	135	101	34	0

OBS: Os valores foram obtidos por secagem rápida, e eram muito maiores do que a realidade.

A aplicação do EQ2 é bastante vantajosas, pois não requer pequenas manutenções corriqueiras como em tensiômetros comuns, necessitando do enchimento de coluna d'água, em sucções mais elevadas. Ideal para lugares mais remotos, como locais mais frios, onde o congelamento não compromete seu funcionamento. Opera em um faixa de temperatura que varia de -10 a $+70^{\circ}\text{C}$, respondendo bem a longos períodos de tempo instalados no solo (profundidades de $\pm 5\text{m}$ abaixo do perfil do solo). O EQ2 está bastante adaptado a estudos de estresse hídrico em plantas, devido ao seu bom desempenho em solos mais secos.

O EQ2 é compatível com diversos *data loggers*, incluindo todos os Delta-T Loggers. Sua calibração em primeiro momento é dispensável, pois o EQ2 já vem pré-calibrado de fábrica.

Os testes com EQ2 em solos salinos ainda são muito pouco significativos. As influências da condutibilidade do solo, até o presente momento nos ensaios praticados ainda não garantiram boa performance deste instrumento nessas classes de solo. Estes

ensaios também indicaram que a alta concentração de sódio tem uma influência negativa na estabilidade de sua resposta ao longo do tempo. Enquanto que algumas sondas TDR demonstram uma dependência das alterações de temperatura, o EQ2 (Equitensiômetro) em solos congelados não é perturbado, mas os valores medidos não são confiáveis, apresentando-se muito elevados. O tempo de resposta e equilíbrio é bastante promissor, porém a pressão de equilíbrio, em relação aos tensiômetros automatizados, é limitada, ≥ 6 kPa/h. Sobre estabilidade a longo prazo, ainda não há registro.

5.2.3 Papel Filtro

O método do papel filtro baseia-se na hipótese que no estado de equilíbrio, o potencial de água de uma certa quantidade ou região de solo e o potencial de água em um papel filtro em contato com o solo, ou próximo dele, são os mesmos. condições. Utilizou tubos capilares com uma membrana parcialmente impermeável. SHULL (1916) citado por MARINHO (1994) desenvolveu um método de determinação indireta da sucção do solo. Usou sementes de plantas que funcionaram como elementos de absorção. Tal procedimento foi posteriormente melhorado por GARDNER (1937) que introduziu o uso do papel filtro. Fez a primeira utilização deste método para medir diretamente a umidade em um solo. Este método foi posteriormente modificado por FAWCETT & COLLINS-GEORGE (1966) que preconizaram o emprego do papel Whatman nº 42, seguido por outra sugestão de McQUEEN & MILLER (1968). Estes dois últimos autores utilizaram um papel Scheicher e Schuel nº 589, tratado por uma solução de pentaclorofenol "Dowcide" - 7" com 3% de concentração, para minimizar o desenvolvimento bacteriano e a decomposição bacteriológica.

O papel filtro colocado em contato direto com o solo, permite a mensuração da sucção matricial e sucção osmótica, através da água líquida. Se pelo contrário, o papel filtro não está em contato direto com o solo, somente a sucção matricial é mensurada, através do contato do papel filtro com vapores d'água presentes nos poros do solo.

As curvas de calibração propostas por McQUEEN & MILLER (1968) para papel Shleicher and Shuell nº 589 e CHANDLER & GUTIERREZ (1986) para o papel Whatman nº 42 podem segundo alguns autores ser utilizadas tanto para a sucção matricial como a total (FREDLUND & RAHARDJO, 1993). MARINHO (1995) contudo, aposta que em função da faixa de valores de sucção total que se esteja trabalhando, deve-se atentar para o tempo dispendido para que se atinja o equilíbrio de umidade solo-papel filtro.

Medidas *in situ* de sucção com o emprego do papel filtro foram recentemente realizadas por CRILLY *et al.* (1991), GOURLEY & VERTAMATTI (1994) e GOURLEY & SCHREINER (1995) com um sistema que entre outros aspectos prioriza cuidados com a perda de umidade quando exposto ao ar. Este equipamento foi essencialmente empregado para estudos de sucção em pavimentos. O dispositivo proposto por MAHLER & DIAS de OLIVEIRA (1997) é mais simples e exige cuidados especiais quanto a exposição ao ar do

papel filtro. A consideração do tempo necessário para o papel filtro atingir o equilíbrio no campo com o meio do seu entorno é de extrema importância e pode variar ao longo do ano, tendo em vista as condições ambientais.

A medida da sucção *in situ* com papel filtro é um procedimento de forma geral bastante simples e não há modificação do conteúdo de água do solo, ou seja, de seu estado de referência. O método pode ser empregado para um amplo domínio da sucção (pF igual a zero a pF igual a 7 ou 10.000 atm) o que não é alcançado por outros métodos. Conforme observado por MARINHO (1995) entretanto, seu uso no campo requer muito cuidado, em especial no que se refere à variação de temperatura, ao que pode se acrescentar cuidados com o tempo de exposição para obtenção do estado de equilíbrio da umidade solo-papel filtro após sua retirada do campo para transporte ao laboratório.

WOODBURN & LUCAS (1995) desenvolveram um novo procedimento para medidas de campo com o papel filtro que compreende a utilização de uma balança eletrônica portátil. O tempo gasto para que o equilíbrio entre o solo e o papel filtro fosse atingido foi de um a três dias. O procedimento parece bastante promissor mas ainda carece de investigações práticas. A Figura 5.9 apresenta um “disco” de papel filtro Whatman nº 42 em escala. Essa amostra de papel filtro é inserida dentro de um tubo de PVC, como demonstrado na Figura 5.10, e cravado no solo, na profundidade desejada do perfil solo.

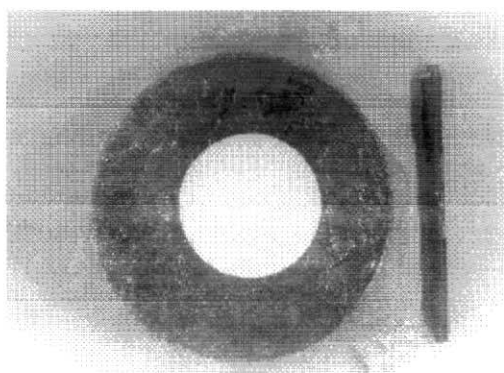


Figura 5.9 Disco de Papel Filtro Whatman nº 42 (MAHLER, C. F., 1997).

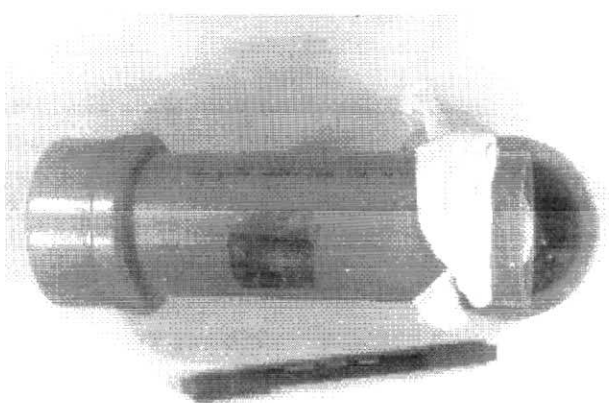


Figura 5.10 Esquema Tubo PVC-Papel Filtro (MAHLER, C. F., 1997).

CHANDLER & GUTIERREZ (1986), mostraram que o método de papel filtro atua melhor em solos de textura mais argilosa, e com um alto grau de saturação. O grau de contato entre o papel filtro e a amostra de solo, é muito importante. Cuidados devem ser tomados, para evitar que o “disco” de papel filtro seja comprimido, caso contrário a absorção de água será restringida. O autor coloca ainda que o tempo de equilíbrio entre a amostra e o “disco” seja em torno de 7 dias, sendo que pelo menos 5 dias são requeridos.

Segundo CRILLY & SCHREINER (1991), as amostras após serem retiradas do solo, deverão ser pesadas em um balança analítica, graduada em 0,0000 g, com um erro aproximado de $\bullet$ 0,0001 g. Após permanecer em uma estufa a $\bullet$ 105° C, por um período de 24 h, a sucção é dada em kPa.

Para o papel filtro Whatman nº 42 (CHANDLER *et al.*, 1992), temos as seguintes expressões (19 e 20), em função do teor de umidade do papel.

Umidades > 47%

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(6,05-2,48 \log w)} \quad (19)$$

Umidades $\bullet$ 47%

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(4,84-0,0622w)} \quad (20)$$

Para o papel filtro Schleicher & Schuell nº 589, temos as seguintes expressões (21 e 22), em função do teor de umidade do papel.

$$\begin{aligned} &\text{Umidades} > 54\% \\ &\text{Sucção (kPa)} = 10^{(1,882-0,01202w)} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} &\text{Umidades} \bullet 54\% \\ &\text{Sucção (kPa)} = 10^{(5,056-0,0688w)} \end{aligned} \quad (22)$$

Onde w é a diferença entre o peso úmido e o peso seco do “disco” de papel filtro.

Algumas vantagens são atribuídas ao método do papel filtro, como determinante da sucção do solo. O fato de ser um método bastante simples e não necessitar de uma fonte geradora de energia, o que é uma grande alternativa para lugares remotos (CRILLY & SCHREINER, 1991). Entretanto, limitações como tempo de equilíbrio, descontinuidade de aquisição de dados, rapidez na retirada e colocação do papel filtro no solo, etc, comprometem utilização da técnica, nos estudos de dinâmica hidrológica dos solos.

5.3 Geotermômetro

A temperatura do solo está relacionada diretamente com a incidência de raios solares sobre essas superfícies, onde parte é refletida e parte é absorvida aumentando a temperatura do solo. Essa variação na temperatura é responsável pela evaporação, reações químicas no colóide do solo e na atividade microbiana.

O sensor de temperatura do solo utilizado no trabalho foi o do tipo Termistor de 10K ou 10000 Ohms (Figura 5.11), que tem um princípio bastante comum no ramo da eletrônica, funcionando como uma resistência, permitindo ou não a passagem de corrente. Sua capacidade de leitura tem uma variação de -20.0 a $+60.0$ °C com um erro de ± 0.1 °C, fabricado pela UP – GmbH.

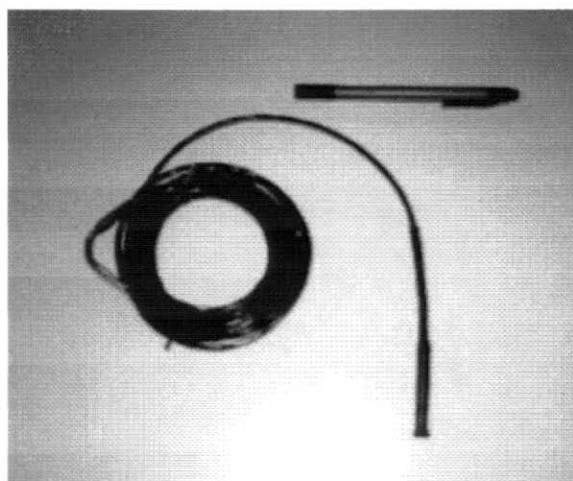


Figura 5.11 Geotermômetro Automatizado – TM3 (UP – GmbH, DE, 2000).

O geotermômetro TM3 como os demais instrumentos automatizados, pode ser conectado a qualquer *data logger*, mensurando a temperatura do solo de forma contínua, sendo de grande utilidade nas correlações com dados ambientais externos, como temperatura e umidade relativa.

5.4 Sistema de Aquisição de Dados Automatizados

Os sistemas de aquisição de dados evoluíram consideravelmente nas últimas duas décadas, principalmente, devido aos avanços tecnológicos da eletrônica digital e ao advento dos microprocessadores. A tecnologia atual possibilita a construção de sistemas microcontrolados bastante eficientes e a baixos custos. Inúmeras são as áreas que se beneficiam com esses sistemas, tais como: as indústrias, a medicina, as pesquisas espaciais, a oceanografia e a agricultura, entre outras.

5.4.1 Data - Logger DL2e

O *data logger* é um instrumento capaz de realizar leitura e armazenar dados providos de uma gama de instrumentos com as mais variadas fontes. Esses dados podem ser lidos através do próprio display do instrumento ou através de um software instalado em um PC, constituindo uma interface.

O *data logger* Delta-T logger DL2e, utilizado neste trabalho (Delta-T Devices, Cambridge, UK), é apresentado na Figura 5.12 Este equipamento de aquisição e armazenamento de dados, possui uma expansão de até 60 canais de leitura, desde que sejam feitas as conexões na parte interna (*ribbon cable - input cards*), 2 canais contadores e 2 canais auxiliares (*relay*) que dispõem de uma fonte de energia extra para alimentar até 15 instrumentos com a voltagem variando de 7 a 15 V. Dispõe de 128 K de memória para armazenamento de dados.



Figura 5.12 Delta Logger DL2e (Delta-T Devices, UK, 2000).

O Delta - T Logger DL2e possui uma fonte externa com voltagem de 12.0 V e um dispositivo interno de alimentação através de um conjunto de 6 pilhas alcalinas, a qual é acionada quando a fonte externa não está disponível. Na face lateral do corpo *data logger*, possui um grupo de terminais onde são conectados os sensores (Figura 5.13). Cada grupo possui 15 canais de leitura e cada canal possui 2 entradas, uma de sinal positivo e outro de sinal negativo.

A comunicação entre o *data logger* - PC é feita por cabo RS 232, desde que seja configurado o *set up* de comunicação em ambas as faces.

A grande versatilidade, robustez, facilidade de manuseio, resistência física, alta compatibilidade de interface, são algumas características que viabilizam a utilização deste equipamento.

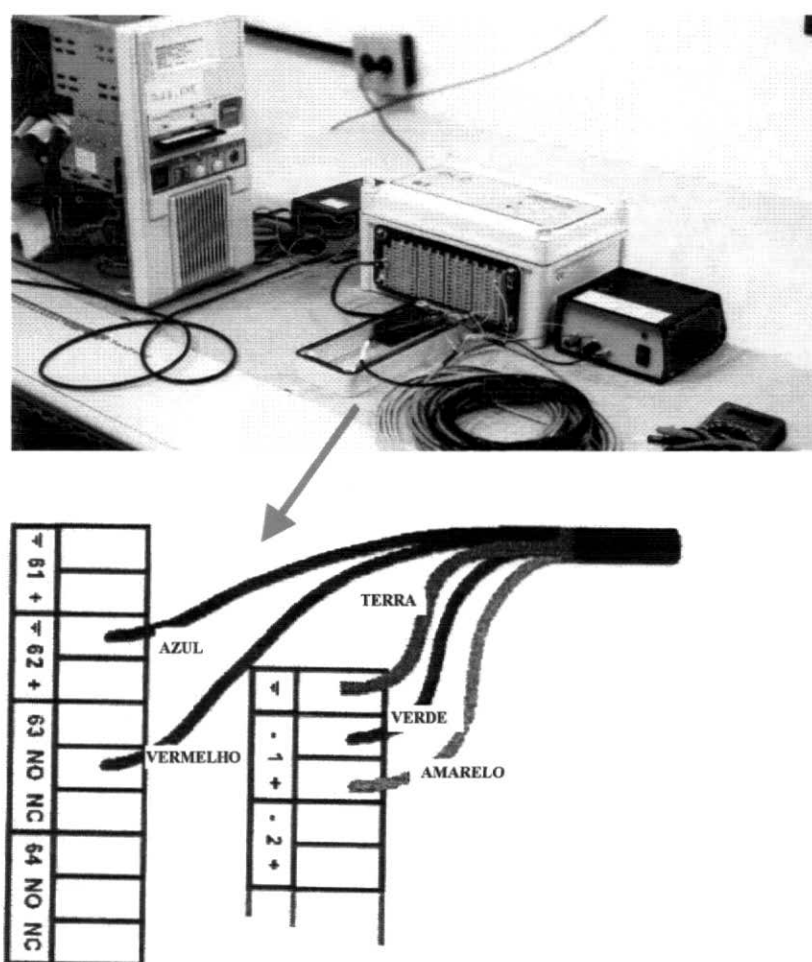


Figura 5.13 Esquema em detalhe das conexões da sonda *theta* ML2 com o *data logger* DL2e (Delta-T Devices, UK, 2000).

6. MATERIAIS E MÉTODOS

Cada mini-lisímetro, foi preenchido com uma camada superficial de 30,0 cm de espessura, de solo homogêneo com textura predominante arenosa, como descrito no item 7.1.1, apoiado sob uma camada de 10,0 cm de espessura de brita zero ao fundo (LIMA, 1998), para facilitar o fluxo de drenagem. Entre a camada de solo e de brita, foi colocada uma manta geossintética, BIDIN op 20, utilizada em estradas pavimentadas para facilitar a drenagem, impedindo a passagem de partículas finas para as camadas inferiores, conforme OLIVEIRA *et al.*, (1997). Por medida de segurança, o fundo dos mini-lisímetros foi devidamente telado, antes de ser preenchido com solo-brita, para evitar possíveis entupimentos, comprometendo todo o processo de "secagem" do solo.

O solo foi removido do Horizonte A, de seu lugar original conforme GROHMANN *et al.* (1951), trazido para o laboratório, seco ao ar, destorroado e passado na peneira 4,00 mm e acomodado nos mini-lisímetros. A Figura 6.1 apresenta o conjunto de três mini-lisímetros instalados em laboratório:

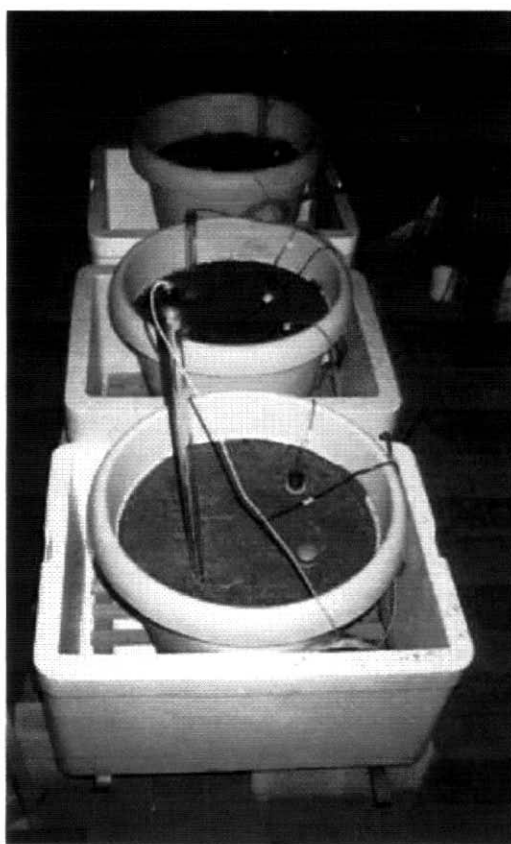


Figura 6.1 Conjunto de Tanques mini-Lisímetros.

Em cada mini-lisímetro foram instalados quatro sensores eletrônicos e um tubo PVC-papel filtro (Figura 6.2). Os sensores eletrônicos, dividiam-se em instrumento de medição direta da umidade, instrumentos de medição indireta da umidade e geotermômetro. O instrumento de medição direta da umidade utilizado no ensaio foi a sonda *Theta* ML2, com dimensões de 207 mm de comprimento total, 40 mm de diâmetro e 60 mm de comprimento das hastes.

O cronograma dos ensaios inicialmente buscou registrar "picos" de saturação de drenagem, porém, devido à demora no processo de secagem do solo, observado anteriormente no mini-lisímetro em laboratório, inicialmente preenchido com solo da Estação Agrometeorológica, que preenchia os lisímetros de campo, o que gerou grande dificuldade de registrar esses picos através dos instrumentos, em consequência da textura do material, que era predominantemente argilosa. A partir deste fato para não comprometer o prazo de entrega deste trabalho, optou-se por utilizar um solo de textura mais arenosa, como descrito no item 7.1.1, uma vez que o estudo do comportamento efetivo do solo em questão não é o assunto mais evidente a ser tratado, atuando meramente como suporte para todo o comportamento do sistema de automação de instrumentação, que é o principal objetivo deste estudo. Sendo assim, sabendo-se que os tensiômetros de equivalência Equitensiômetros-(EQ2) fornecem uma leitura do potencial matricial com maior eficácia na faixa de -100 a -1000 kPa, e pela necessidade de ter dados de altas sucções, por precaução, estes foram os primeiros instrumentos a serem colocados nos tanques, seguidos pelas sondas *Theta* ML2, geotermômetros e tubos de PVC-papel filtro, registrando dados do solo que aparentemente apresentava-se seco. Logo após o registro desses dados, iniciou-se a primeira saturação, inserindo no solo então, os tensiômetros automatizados T4A. Estes instrumentos só puderam ser colocados a partir deste ponto, pois em sucções acima de -85 kPa, ocorre a saída de água da cápsula porosa para o solo, e o instrumento não consegue mais registrar dados de sucção do solo, tendo que ser recarregado de água desaerada no interior do tubo, conforme descrito nos apêndices. O solo foi saturado e a condição de estado constante foi alcançada, quando os tensiômetros apresentaram 0 kPa, conforme descrito por SINGH *et al.* (1987), observada no "display" do *data logger*. A escolha do tensiômetro como referência deveu-se a sua rapidez de resposta da dinâmica hidrológica dos solos, característica principal deste instrumento.

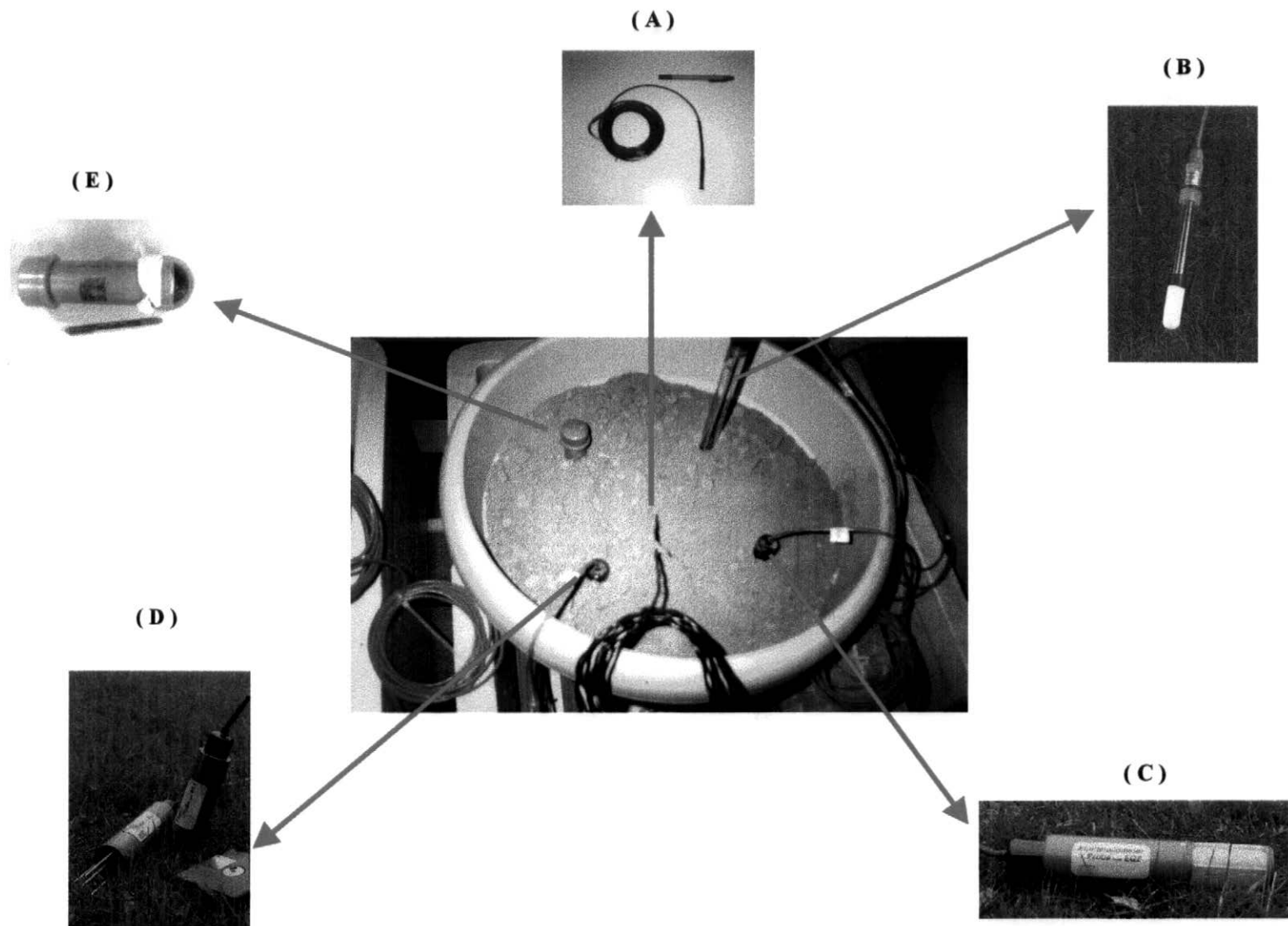


Figura 6.2 Distribuição dos Instrumentos nos Baldes: A -Termômetro de Solo 10 K; B - Tensiômetro Automatizado T4A; C - Tensiômetro de Equivalência EQ2; D - Sonda *Theta* ML2; E - Tubo PVC - papel filtro.

A segunda saturação ocorreu cerca de 45 dias após a primeira, apresentando uma sucção equivalente a -80 kPa em média nos tanques.

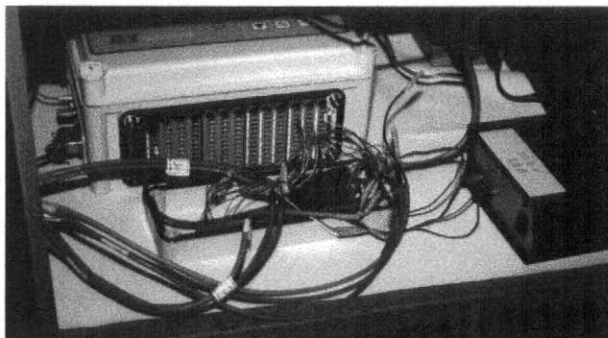
Os instrumentos de medição indireta da umidade foram compostos de tensiômetros automatizado T4A, com dimensões de 50 e 100 mm de comprimento total e 20 mm de diâmetro e tensiômetro de equivalência, Equitensiômetro-EQ2, com dimensões de 215 mm de comprimento total e 40 mm de diâmetro. O sensor de temperatura de solo (geotermômetro) utilizado nos ensaios, foi o termistor 10 K.

Para fins de instalação dos instrumentos, utilizou-se o auxílio de um trado de rosca e caneco, introduzido os instrumentos e o tubo de PVC-papel filtro, a uma profundidade de 15,0 cm, com espaçamento de 20,0 cm entre eles, e 15,0 cm da borda dos baldes conforme FERNANDES *et al.*, (1989). O tensiômetro T4A e o Equitensiômetro-EQ2, permaneceram em uma solução de água destilada por 24 h antes de serem colocados nos mini-lisímetros, a fim de terem suas cápsulas porosas saturadas.

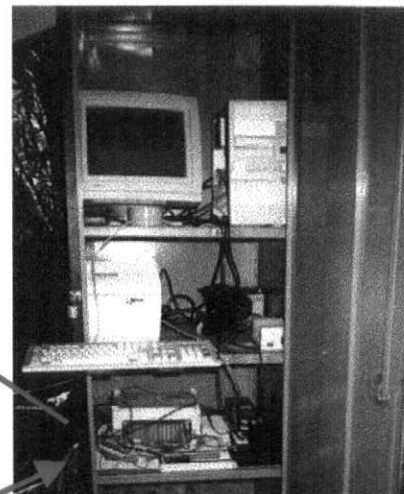
O ensaios com os mini-lisímetros foram conduzidos em laboratório, no período de fevereiro a julho de 2000, com acompanhamento diário dos resultados através coleta e armazenamento de dados feito por *data-logger* (Figura 6.3) . Os instrumentos eletrônicos foram conectados a um sistema automático de aquisição de dados, feito pelo Delta-T Logger DL2e (GÖTTLEIN & BLASEK, 1996), o qual registra dados pré-programados: (kPa) Tensiômetro T4A, (mV) Tensiômetro de Equivalência - Equitensiômetro, (mV) TDR e (graus °C) Geotermômetro.

Entre fevereiro e março, foram realizados dois ciclos de molhamento e secagem do solo nos mini-lisímetros. O processo consistiu em aplicar uma irrigação artificial nos tanques, utilizando um "regador" comum de jardim para distribuir melhor o volume de água no solo, formando uma lâmina de 5,0 cm na superfície do solo, e assim sucessivamente até ocorrer o primeiro sinal de drenagem, por volta de de 1 hora após o início do ensaio. A partir do momento em que se observou a presença de água no fundo dos mini-lisímetros, o processo de saturação foi interrompido. O volume de água presente no fundo do tanque foi coletado através de um furo no fundo da caixa isopor.

(C)



(B)



(A)



Figura 6.3 Sistema Automático de Aquisição de Dados: A - Visão Geral do Laboratório; B - Gabinete de Aquisição de Dados; C - Data *Logger* Delta - T DL2e.

As leituras foram feitas de 10 em 10s nas primeiras 48 horas após a saturação, aumentando o intervalo de registro para 2 em 2 horas, a medida que se observou pouca ou quase inexistente variação nos dados coletados. Os instrumentos instalados nos tanques foram alimentados por duas fontes separadas, de 12 e 10.5 V 1 A, ligadas em um *no break*, conforme descrito nos apêndices.

Já para o método do papel filtro, foram usados o papel Whatman nº 42, muito utilizado em laboratório, conforme CHANDLER & GUTIERREZ (1986). Os “discos” de papel de filtro, foram colocados em duas amostras por tubo de PVC, de dimensões 25,0 cm de comprimento por 25 mm de diâmetro (1"Ø). Esses tubos são feitos a partir de tubos de PVC de encanamento hidráulico do tipo Linha Fixa, colando um pedaço de haste de plástico na parte interna dos canos para evitar contato do papel de filtro com as paredes que podem comprometer os resultados, o que não é desejável, pois o processo deve se dar pela troca de umidade entre o papel filtro e a atmosfera interna dos tubos.

Para o tubo PVC-Papel Filtro, foram feitos dois tipos de amostragem: de 7 em 7 dias e de 15 em 15 dias, até o solo atingir uma sucção de -100 kPa. A partir desse ponto, as leituras passaram a ser feitas de 15 em 15 dias, ou seja, somente uma amostra de papel de filtro para cada tubo de PVC.

Os “discos” de papel filtro foram retiradas dos tubos com auxílio de uma pinça do tipo cirúrgica e em seguida transportados até o laboratório anexo de análises. O transporte das amostras de papel foi feito em sacos de plástico protegidos, como desses encontrados no mercado para embalagem de congelados, seguido de pesagem das amostras de papel úmida, em uma balança analítica graduada em 4 casas decimais, com $\pm 0,0001\text{g}$ de erro (CRILLY & SCHREINER, 1991) e pesagem das mesmas amostras após a secagem, passando por uma estufa $\pm 105^\circ\text{C}$ dentro de um período de 24h.

Foram feitas as leituras de temperatura e umidade do ar medidas através de um termo-higrógrafo digital (TFA[®], Germany), mostrado na Figura 6.4, sendo consideradas as leituras máxima e mínimas, diariamente. A importância de se fazer tais acompanhamentos, se justifica pelo fato se tratarem de variáveis ambientais, que mesmo dentro de ambiente protegido como no caso de laboratório, devem ser consideradas, pois ainda que em uma escala menor, exercem uma influência no comportamento dos processos físicos do solo em estudo.

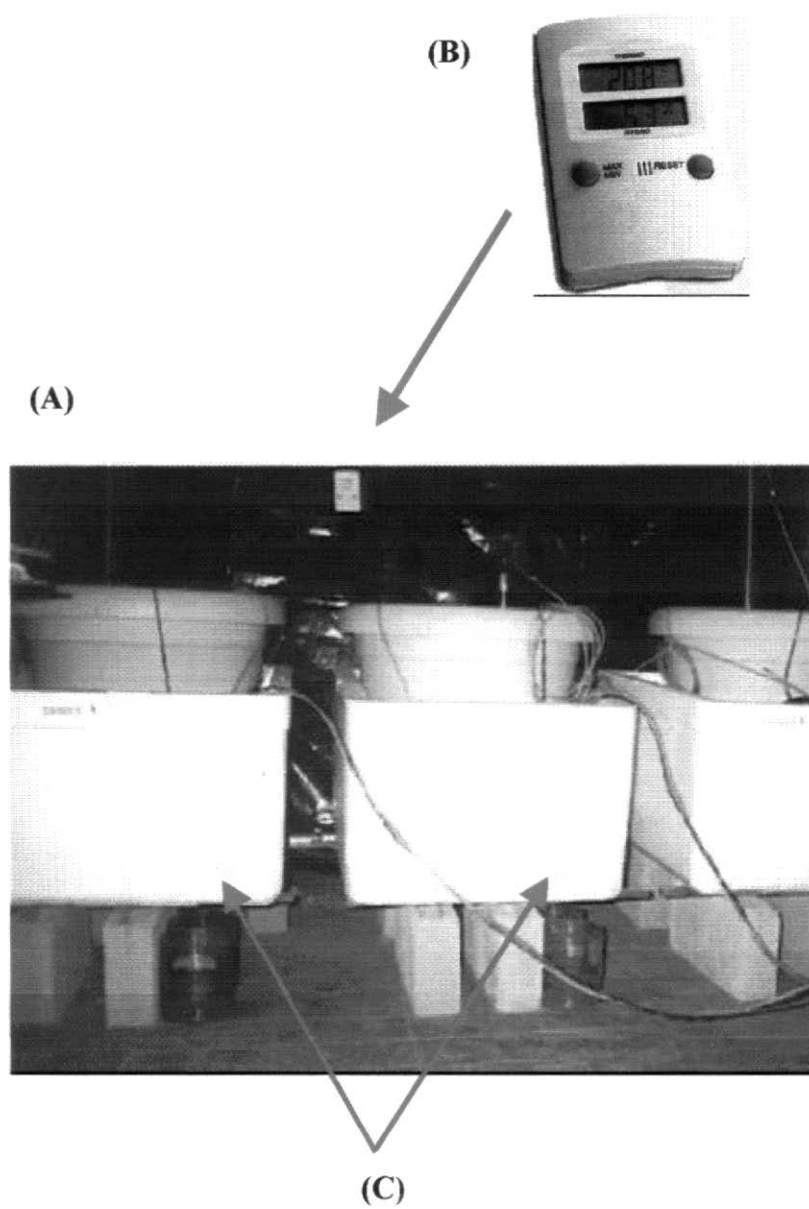


Figura 6.4 A - Vista geral do Conjunto de mini - Lisímetros; B – Termohigrógrafo TFA[®]; C - Coletor de drenagem.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Caracterização de Solo Estudado

O solo utilizado no mini-lisímetros foi coletado em um perfil localizado na base de uma topossequência (Figura 7.1), que já havia sido caracterizada por SILVA, M. B. (1993), como um Planossolo álico, Tb abruptico, A moderado, textura areno/argilosa, fase floresta tropical sobcaducifólica, relevo suave ondulado, segundo os critérios do SNLCS (EMBRAPA/SNLCS, 1988 a e b).

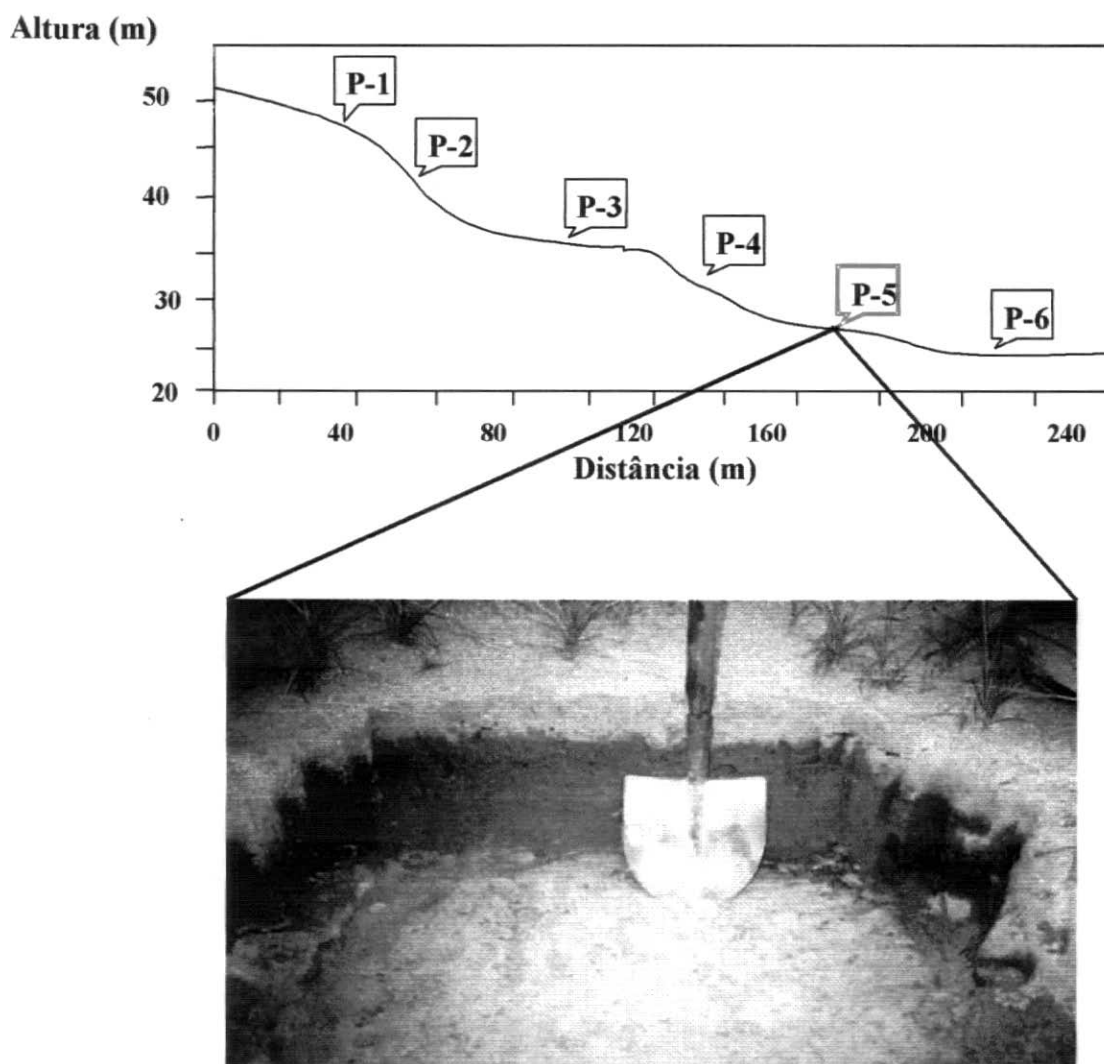


Figura 7.1 A figura apresenta o Horizonte A do perfil do solo (P-5), da topossequência do campus da UFRRJ.

Este perfil esta inserido na margem do campus da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), situado Estado do Rio de Janeiro, na região conhecida como baixada de Itaguaí, entre os paralelos $22^{\circ} 49'$ e $22^{\circ} 45'$ de latitude sul e os meridianos $43^{\circ} 38'$ e $43^{\circ} 42'$ de longitude oeste de Greenwich (Figura 7.2).

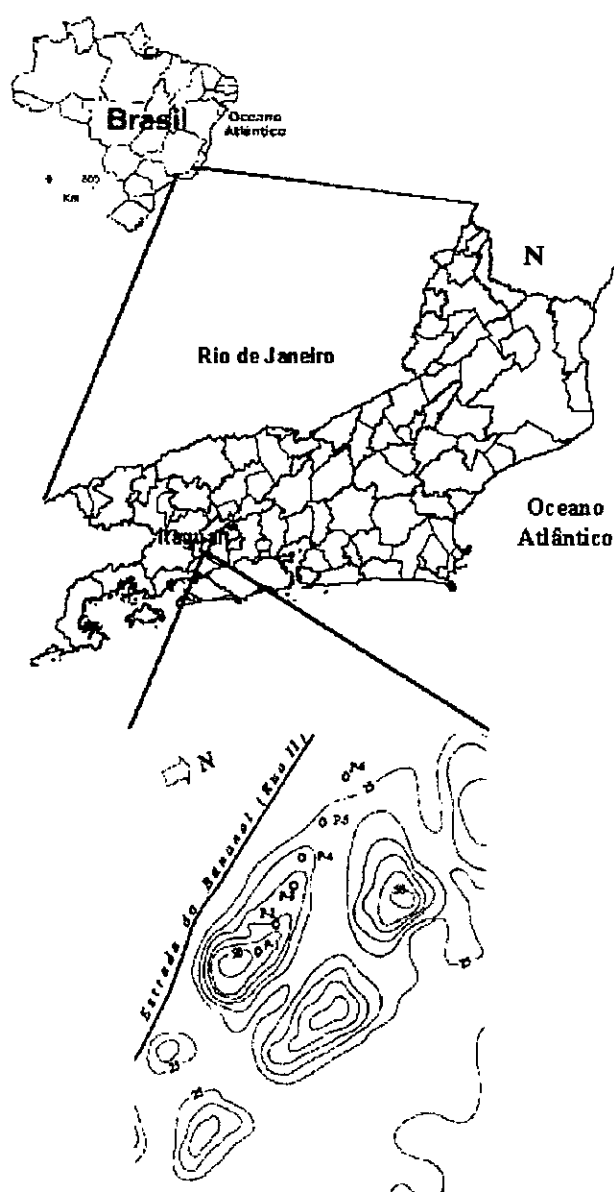


Figura 7.2 Esquema da localização do topossequência do campus da UFRRJ.

O material coletado foi seco ao ar, destorroado e passado na peneira de # 4,0 mm, para posterior caracterização. A decisão de trabalhar com um solo de um perfil textura mais arenosa, já estudado, foi em necessidade de avançar na realização dos ensaios, de saturação, de drenagem e do monitoramento através de instrumentos automatizados, o que não havia sido evidenciada na primeira fase do trabalho, onde se utilizou o solo da Estação Agrometeorológica da UFRJ, constituído de um material extremamente argiloso e heterogêneo, limitando a infiltração e percolação, como já mencionado.

7.1.1 Granulometria

A curva granulométrica traçada em laboratório (Figura 7.3), a distribuição das frações temos aproximadamente 52 % areia grossa, 28 % areia fina, 80 % de areia total, 13 % de silte e 7 % da fração argila (Tabela 7.1). O que caracteriza um solo com predominância da fração areia, evidenciando um solo de boa drenagem.

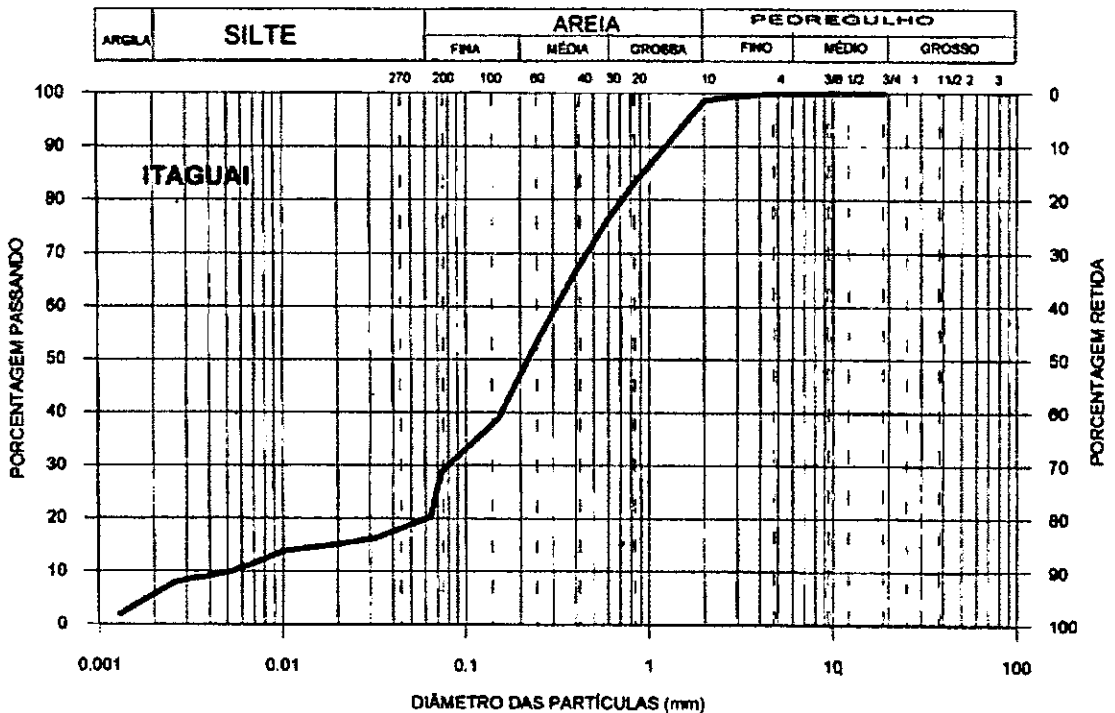


Figura 7.3 Curva Granulométrica do solo do perfil (P-5).

Tabela 7.1 Resultado da distribuição granulométrica do solo (%) do perfil (P-5) (Geotecnia-PEC-COPPE-UFRJ).

	AREIA (%)		SILTE (%)	ARGILA (%)
	GROSSA	FINA		
	52	28	80	13
				7

7.1.2 Textura

De acordo com a o triângulo para análise granulométrica (Figura 7.4) o solo se classifica como um solo de textura areia franca.

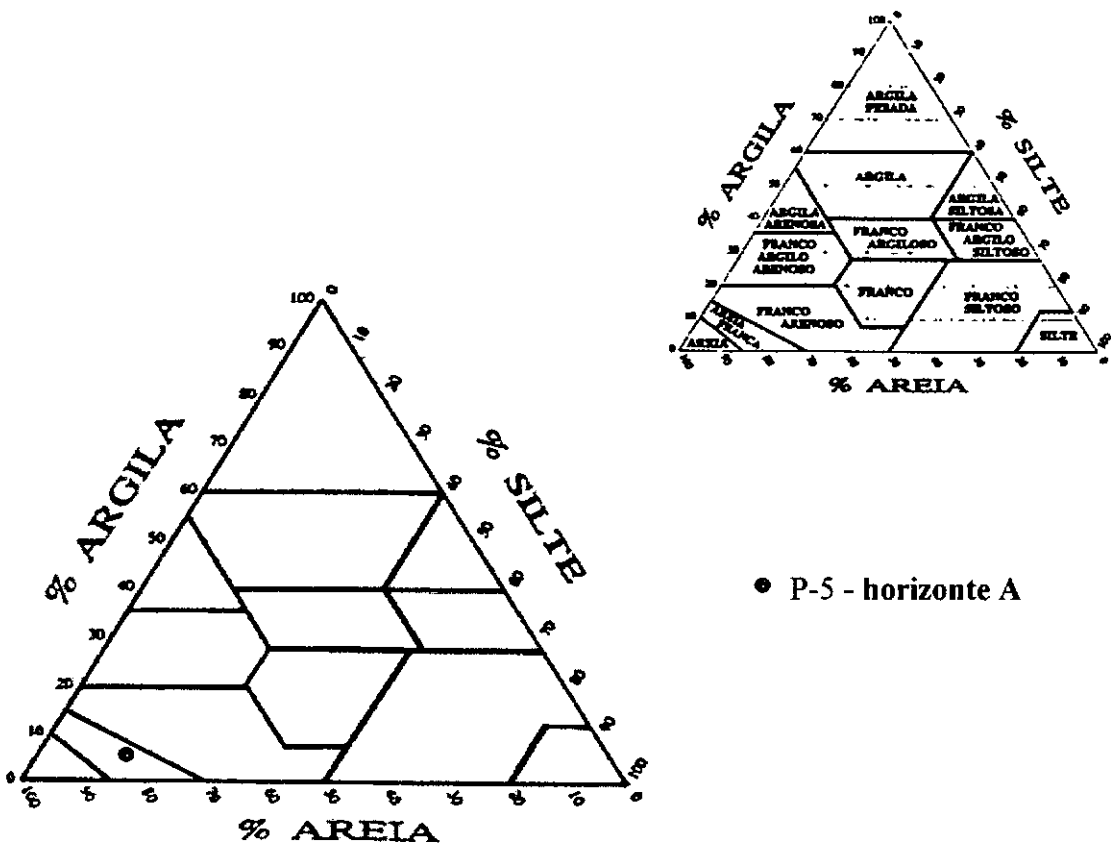


Figura 7.4 Esquema da distribuição das frações granulométricas através do triângulo textural (modificado de BRADY, 1989).

7.1.3 Estrutura

A Tabela 7.2 apresenta os valores médios de densidade das partículas e do solo, micro e macroporosidade. Os dados obtidos pelas amostras coletadas no campo e nos tanques mini-lisímetros, após serem submetidas a esses ensaios, demonstraram uma variação pouco significativa, o que foi muito representativo para os ensaios de laboratório, perante as condições de campo.

Tabela 7.2 Resultado de densidade de partículas, densidade do solo, porosidade, micro e macroporosidade (LAPS-EMBRAPA/CNPS).

Amostras	Densidade de Partículas	Densidade do Solo	Porosidade (%)	Microporosidade (%)	Macroporosidade (%)
	g/cm ³				
Perfil	2.62	1.67	36.5	19.5	15.0
Tanque-A	2.62	1.64	37.7	24.0	13.7
Tanque-B	2.62	1.59	39.0	24.3	15.4
Tanque-C	2.62	1.60	38.7	24.3	14.4

7.1.4 Índice de Plasticidade e Limite de Líquides

A determinação dos índices físicos Limite de Líquides pela NBR 6459 e Limite de Plasticidade pela NBR 7180, no material de estudo, não foram possíveis pelo fato do solo apresentar uma fração argila muito baixa (7%), o que o classifica como um solo não plástico (NP).

7.1.5 Curvas de Retenção de Umidade

No Gráfico 7.1 estão dispostas as curvas de Retenção de Umidade, feitas a partir das amostras coletadas no campo e nos mini-lisímetros em laboratório. Estes dados indicam que o solo coletado no horizonte A do perfil (P-5), da topossequência do campus da UFRRJ, utilizado nos ensaios, apresenta uma umidade de saturação entre 35 a 40 %, estando esta bem próxima de sua capacidade de campo. Os dados obtidos nos ensaios de determinação da curva de umidade característica do solo, são apresentados nas Tabelas dos Apêndices.

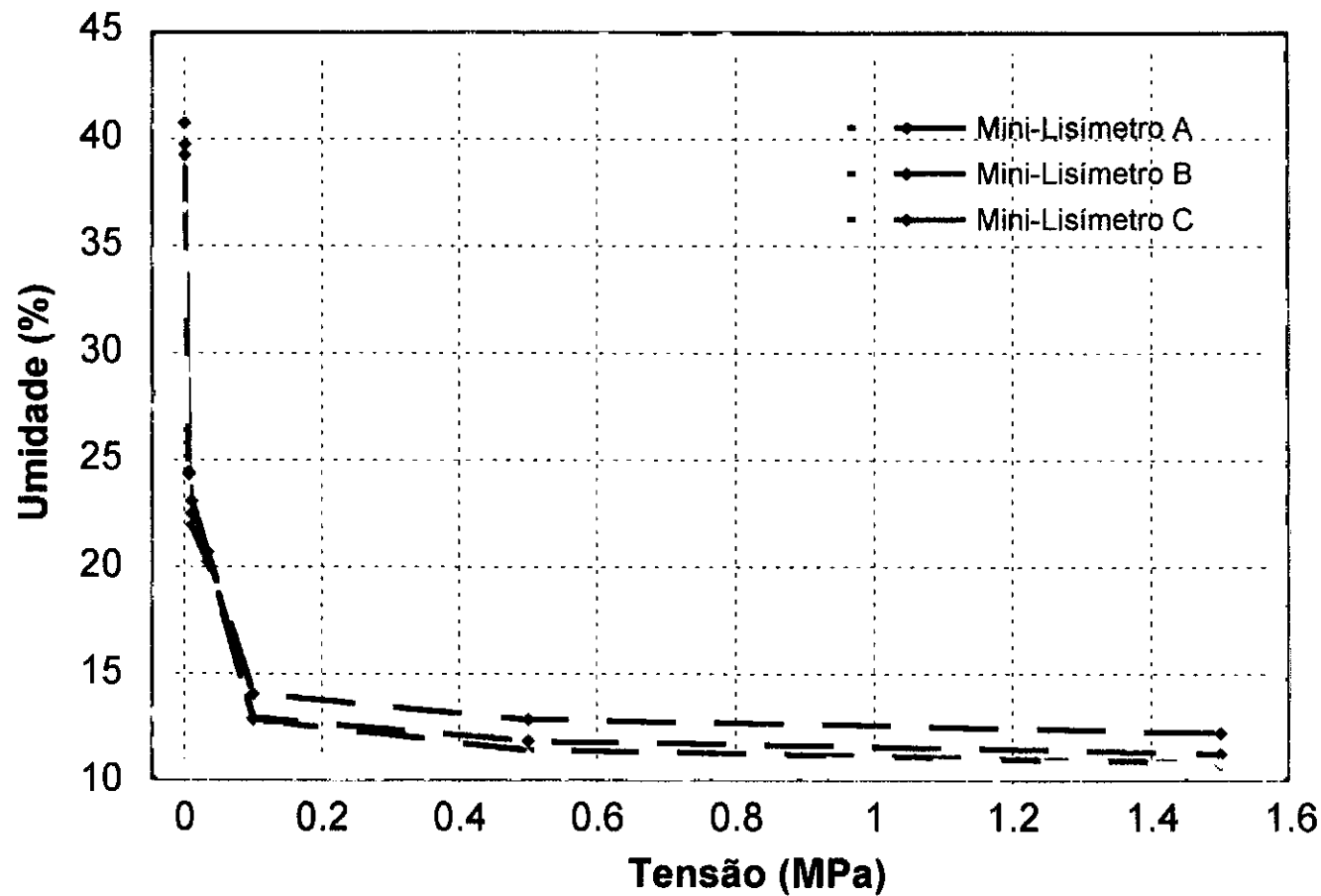


Gráfico 7.1 Curvas de Retenção de Umidade do horizonte A do perfil (P-5), do solo de uma topossequência do campus da UFRRJ (LAPS - EMBRAPA/CNPS).

7.2 Ensaio de Saturação e Drenagem

O solo após ser acondicionado nos mini-lisímetros, foi submetido ao primeiro ensaio de saturação e drenagem, ocorrido em 10 de fevereiro de 2000 (Gráfico 7.2). Cada tanque foi saturado com um volume de água de aproximadamente 13,0 litros, correspondendo a 39 % do total de volume do solo, o que está bem coerente com os resultados obtidos através da curva de retenção de umidade obtida em laboratório. A drenagem iniciou-se cerca de 1 hora após o início da fase de saturação, estendendo-se por um período de 5 horas, sendo mais intensa na primeira meia hora (Tabela 7.1). Os três mini-lisímetros demonstraram boa capacidade de drenagem, o que já era de se esperar, devido ao fato do solo em questão ser de textura arenosa (descrito no item 7.1.1), sendo a drenagem mais intensa inicialmente no tanque A durante as primeiras 24 horas, entretanto o maior volume drenado foi observado no mini-lisímetro B, ao longo dos dias sucessivos ao início do ensaio.

Tabela 7.1 Dados obtidos no 1º Ensaio de Saturação x Drenagem.

	TanqueA		TanqueB		TanqueC	
Tempo	SAT	DREN	SAT	DREN	SAT	DREN
10/02/00 11:00	8.00		8.00		8.00	
10/02/00 11:15	1.50		1.50		1.50	
10/02/00 11:30	1.50		1.50		1.50	
10/02/00 11:45	1.00		1.00		1.00	
10/02/00 12:00	1.00		1.00		1.00	
10/02/00 12:10		1.0		1.000		1.000
10/02/00 12:40		0.8		1.250		1.100
10/02/00 13:10		0.3		1.000		0.200
10/02/00 17:00		0.050		0.150		0.300
11/02/00 12:00		0.150		0.000		0.100
Total Irrigado	13.0		13.0		13.0	
Total Drenado		2.3		3.4		2.7

Em 15 de março de 2000, as leituras observadas pelos tensiômetros automatizados instalados nos mini-lisímetros, encontravam-se uma sucção matricial média do solo entorno de -75kPa , o que já era um indicativo de comprometimento do funcionamento destes instrumentos, que de acordo com o fabricante, estes, a partir de -75kPa , podem entrar em processo de cavitação, com a saída de água da cápsula porosa e entrada de ar em seu

sistema, sendo assim, comprometendo as leituras detectadas pela membrana transdutora de pressão. Deste modo, o volume a ser completado nos mini-lisímetros, para se iniciar o segundo ensaio de saturação e drenagem, foi executado a partir dos dados de % de umidade momentânea, feitas conforme as leituras observadas nas sondas TDR (Tabela 7.2), que era de 18 % no mini-lisímetro A, 27 % no mini-lisímetro B e 22 % no mini-lisímetro C.

Tabela 7.2 Dados obtidos pela sonda TDR

	TanqueA	TanqueB	TanqueC
15/03/00 11:25	18%	27%	22%
Volume (l)	5.8	8.7	7.1

O segundo ensaio de saturação de drenagem foi realizado em 15 de março de 2000, considerando a estimativa da sonda TDR (Gráfico 7.2), utilizando como medida de volume a ser aplicado nos mini-lisímetros, a diferença do volume inicial aplicado no primeiro ensaio de saturação e drenagem, pela umidade presente nos mini-lisímetros neste período, acrescido de 20% do volume inicial para compensar o erro ocorrido no primeiro ensaio (Tabela 7.3). Desta forma os volumes de água aplicados nos mini-lisímetros foram: 11,0 litros para o mini-lisímetro A, 10.4 litros para o mini-lisímetro B e 10.7 litros para o mini-lisímetro C. O processo de drenagem observado no segundo ensaio, foi mais intenso no mini-lisímetro A, seguido do mini-lisímetro B.

Tabela 7.3 Dados obtidos no 2º Ensaio de Saturação x Drenagem.

	TanqueA		TanqueB		TanqueC	
Tempo	SAT	DREN	SAT	DREN	SAT	DREN
15/03/00 11:50	3.10		3.10		3.10	
15/03/00 12:05	2.00		2.00		2.00	
15/03/00 12:20	2.00		2.00		2.00	
15/03/00 12:35	2.00		2.00		2.00	
15/03/00 12:40		1.600		1.600		1.320
15/03/00 12:50	1.90		1.30		1.60	
15/03/00 12:55		1.830		1.810		1.530
15/03/00 13:10		1.930		1.535		1.550
15/03/00 17:00		0.780		0.670		0.760
16/03/00 12:00		0.150		0.150		0.250
Total Irrigado	11.0		10.4		10.7	
Total Drenado		6.3		5.8		5.4

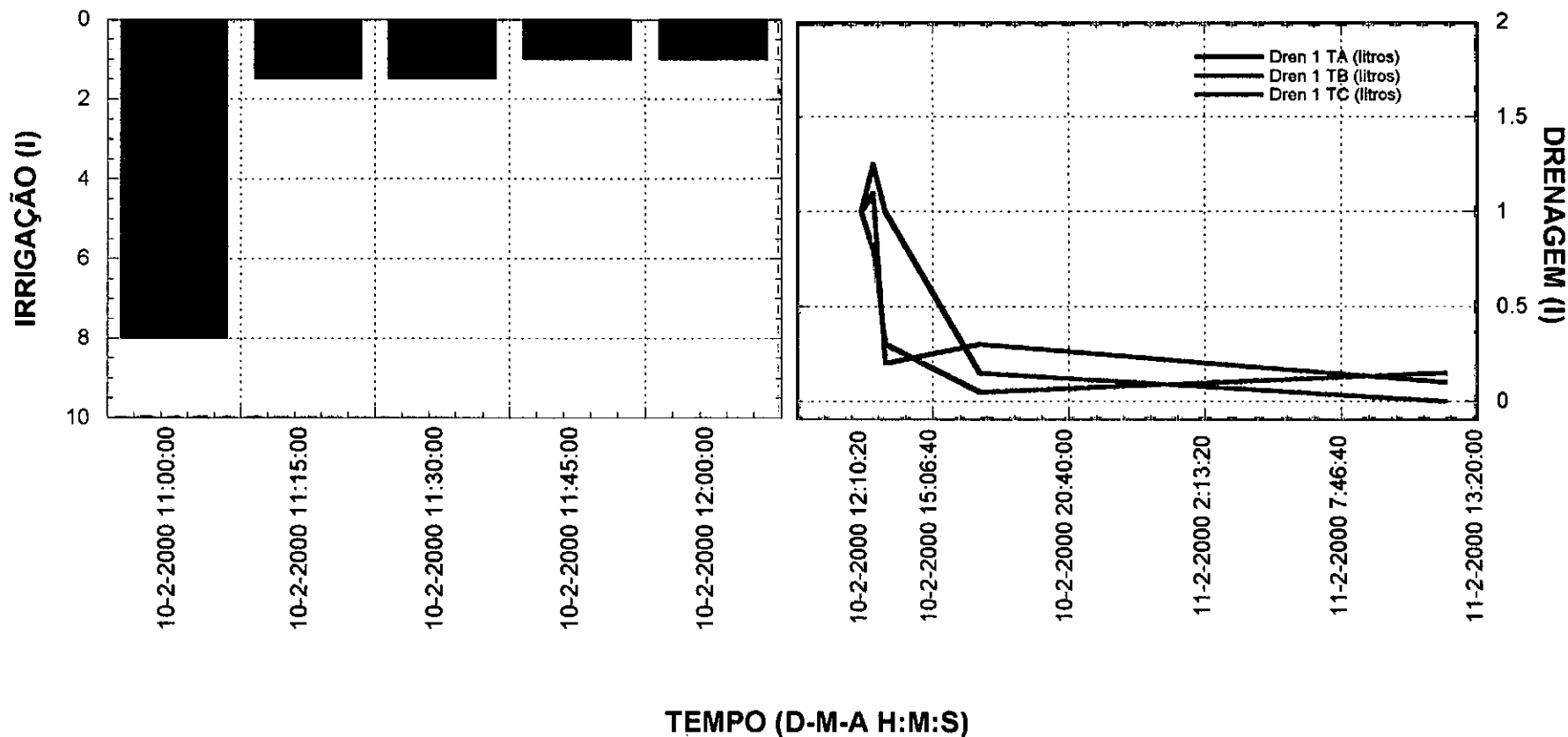


Gráfico 7.2 Relação irrigação x drenagem obtidas nos tanques mini-lisímetros A, B e C, durante o primeiro ensaio de saturação, em meados de fevereiro de 2000.

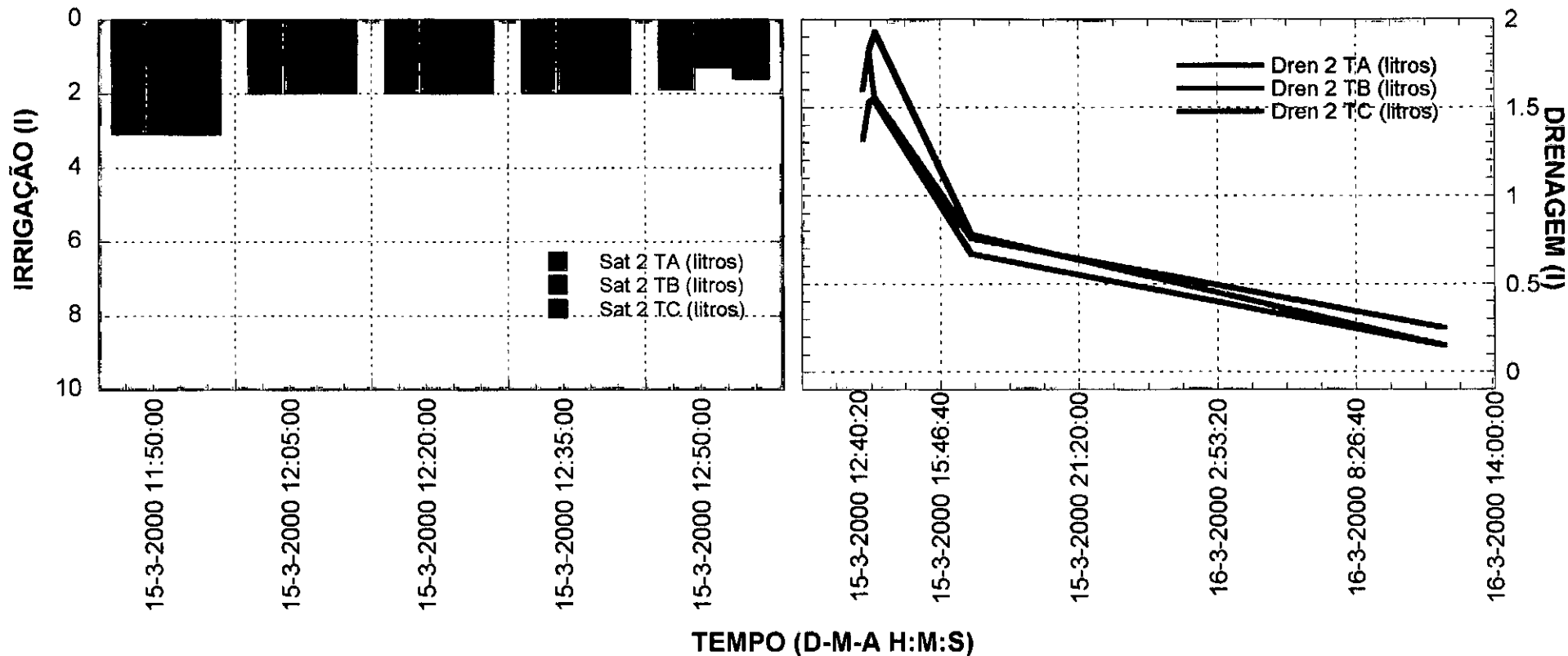


Gráfico 7.3 Relação irrigação x drenagem obtidas nos tanques mini-lisímetros A, B e C, durante o segundo ensaio de saturação, em meados de março de 2000.

7.3 Instrumentação

Nos ensaios de saturação e drenagem realizados em laboratório, buscou-se obter dados que indicassem uma resposta rápida, contínua e elevada da sucção do solo, assim como a umidade correspondente. A importância de se obter dados com essa precisão no estudo do movimento de água no perfil de solo, está na razão de este ser um processo relativamente rápido nos primeiros horizontes do solo, o que caracteriza a importância da instrumentação automatizada, na aquisição e armazenamento desses dados.

SINGH *et al.* (1987), demonstram que o potencial de água em relação a evaporação, decresce rapidamente da superfície para a subsuperfície, porém permanece inalterado nas profundidades de aproximadamente 1,0 m. Consequentemente o processo de drenagem é mais acentuado nas camadas da superfície para subsuperfície, do que nas camadas mais profundas.

Neste contexto, e considerando que a limitação individual de cada instrumento, já experimentada e consumada nas referências dos fabricantes e da literatura citada, com relação a capacidade de detecção dessas variáveis, os resultados obtidos no decorrer dos ensaios, foram divididos em duas fases: sucções abaixo de -100 kPa, para tensiômetros e sucções acima de -100 kPa para tensiômetros de equivalência – Equitensiômetros e método papel filtro. Ambas as fases foram acompanhados também pela sonda de determinação direta da umidade (TDR) e pelo geotermômetro.

No decorrer do processo de saturação, iniciou-se no solo acondicionado nos tanques mini-lisímetros, o processo de “secagem” deste solo, primeiramente com movimentos de percolação e drenagem aparente, até tornar-se esse processo menos significativo. Neste caso, como a perda da água se dava lentamente e por evaporação apenas, após cessar a drenagem aparente, considerou-se que a umidade do solo era constante de ponto a ponto na mesma profundidade de instalação dos instrumentos e que a água dos tensiômetros estava em equilíbrio com a água do solo (LIBARDI & REICHARDT, 1988).

Nos Gráficos 7.4 e 7.5 são apresentados o comportamento dos tensiômetros automatizados e das sondas TDR, no momento em que efetuou-se a saturação do solo nos mini-lisímetros. A diferença entre o tempo de resposta entre esses dois instrumento é bem evidente.

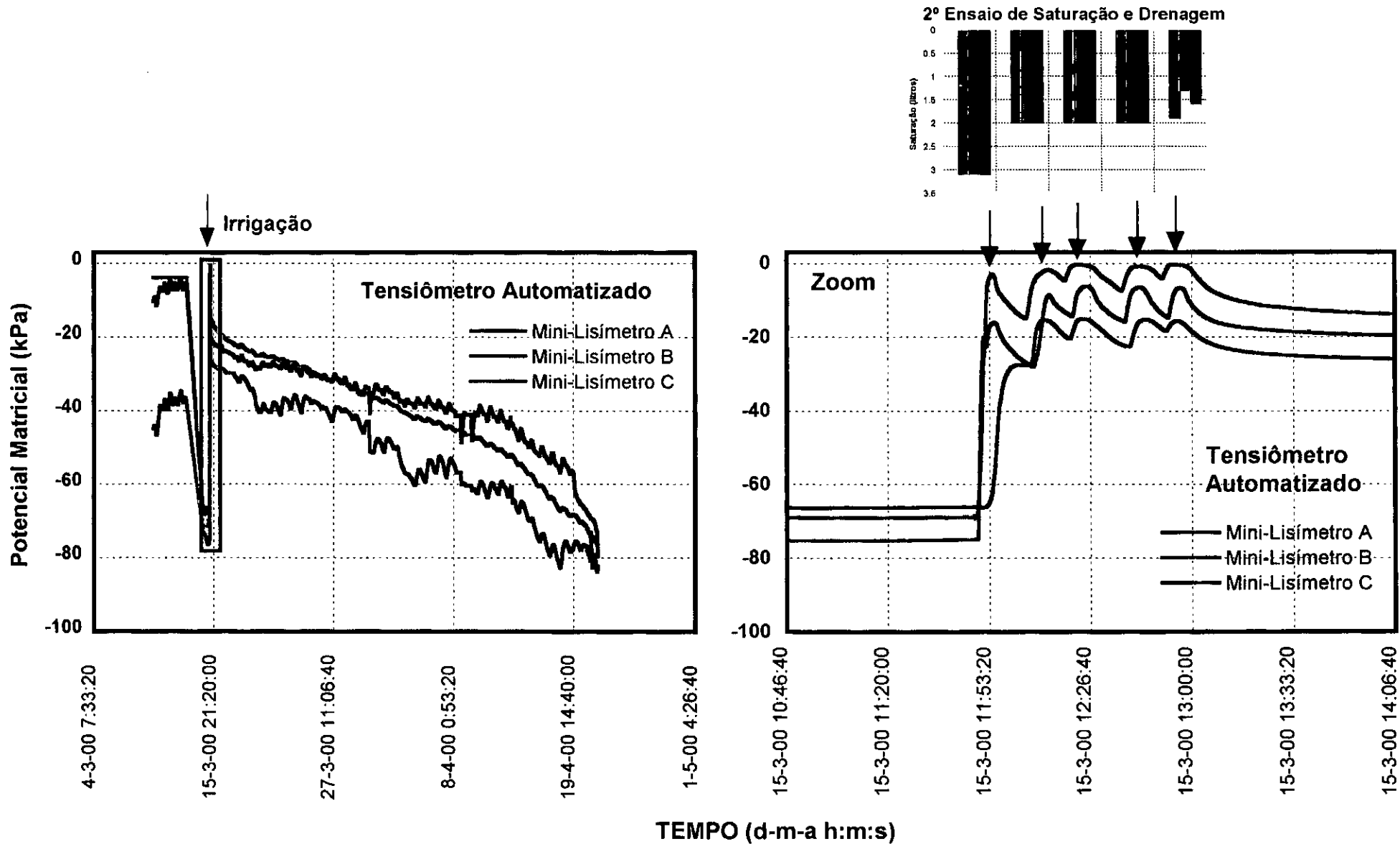


Gráfico 7.4 Comportamento do Tensiômetro automatizado (kPa) no momento da realização da 2º ensaio de saturação e drenagem em cada Mini-lisímetro.

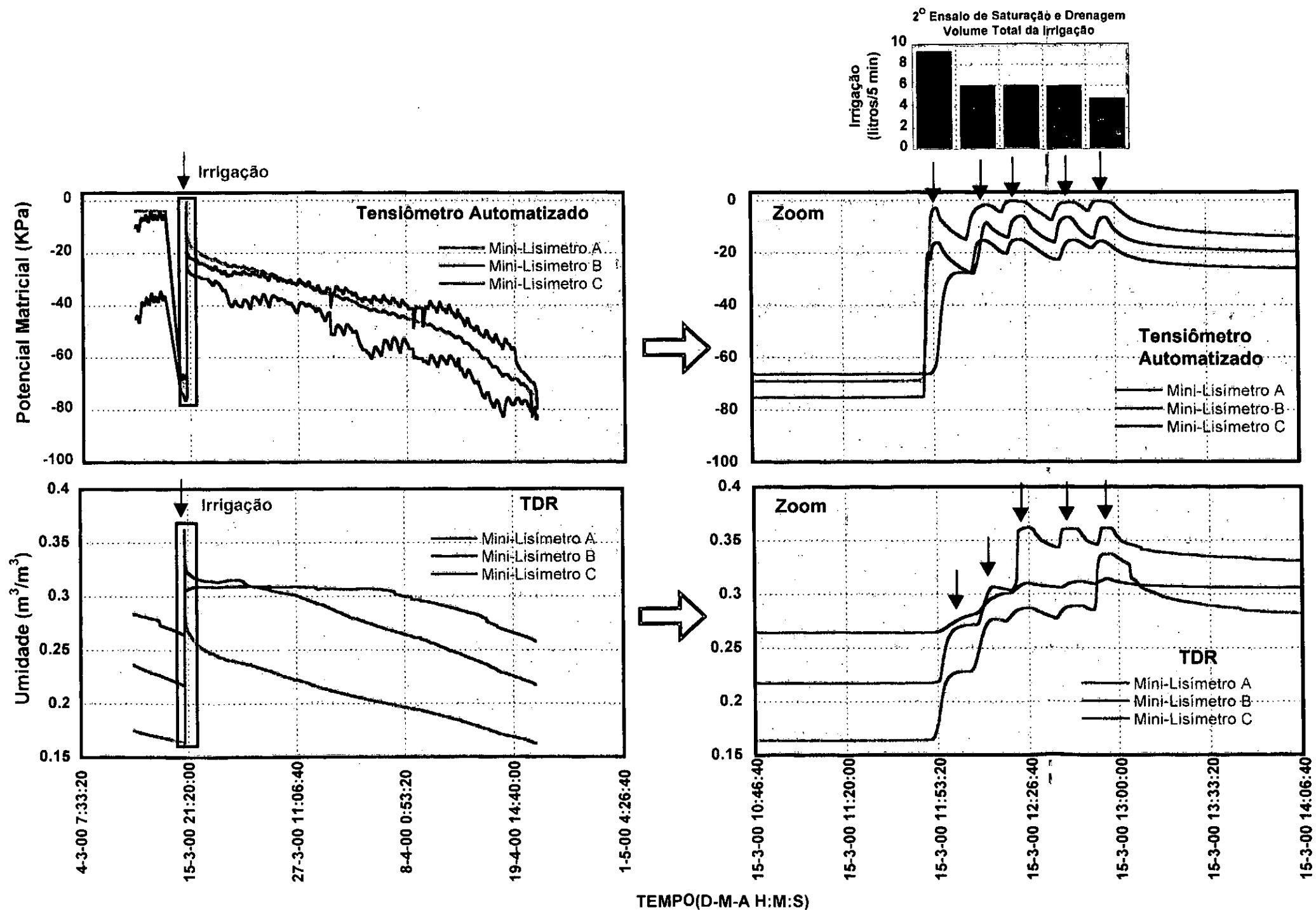


Gráfico 7.5 Resposta do comportamento do tensiômetro e do TDR em potencial matricial (kPa) e a umidade, respectivamente, a irrigação ao longo do tempo.

Os resultados obtidos pelos tensiômetros automatizados, foram bastante significativos (Gráfico 7.6), pelo fato de apresentarem uma resposta rápida do potencial matricial (Ψ_m), observado durante a saturação do solo nos mini-lisímetros, estendendo-se até valores de -80 kPa. Na ocasião do 1º ensaio de saturação e drenagem, pelo fato de ainda não termos um domínio na configuração deste instrumento no *data logger*, bem como uma falha no armazenamento do tensiômetro antes de instalar no tanque A. Este instrumento não estava imerso em água desaerada, perdendo água do interior de sua cápsula para o ambiente, o que compromete sua leitura, pela presença de bolhas ar em contato com a membrana transdutora de pressão. Esta falha foi corrigida na ocasião em que se realizou o 2º ensaio de saturação e drenagem.

Os resultados obtidos pela sonda TDR durante os dois ensaios de saturação e drenagem, e nos períodos seguintes, quando se elevou a sucção, foram bastante satisfatórios (Gráfico 7.7), principalmente, comparando-se com os dados obtidos pela curva de retenção de umidade (Tabela 7.3), atingindo valores de % de umidade de saturação entre 35 a 40 % no instante da saturação. Logo, quando o potencial matricial (Ψ_m) encontrava-se a valores próximos a 0 kPa, e valores próximos de 5 % de umidade, quando o potencial matricial elevou-se para valores acima de -100 kPa.

Os resultados obtidos pelo tensiômetros de equivalência – Equitensiômetro (Gráfico 7.8), mostraram-se pouco significativos para sucções abaixo de -100 kPa, embora as referências do fabricante indiquem uma resposta com uma precisão considerável (erro de ± 10 kPa). Por outro lado, a partir do momento em que se elevou a sucção, a valores acima de -100 kPa, quando o solo encontrava-se em processo de secagem (Figura 7.5), o equitensiômetro só conseguiu registrar dados de sucções de até -300 kPa. Esse fato pode ser explicado pela necessidade de envolver a cápsula porosa do equitensiômetro, com um material composto de partículas extremamente finas, o que poderia facilitar o aumento da sucção obtida pelo instrumento.

Apesar dos resultados apresentados no final dos ensaios, quando as leituras obtidas demonstraram valores de sucção bastante parecidos com os valores obtidos no início dos ensaios, é pouco provável que esses resultados sejam representativos. Por ser um instrumento que tem como princípio de funcionamento semelhante a sonda TDR, ou seja, um campo eletromagnético percorrendo um conjunto de hastes, e que no caso do

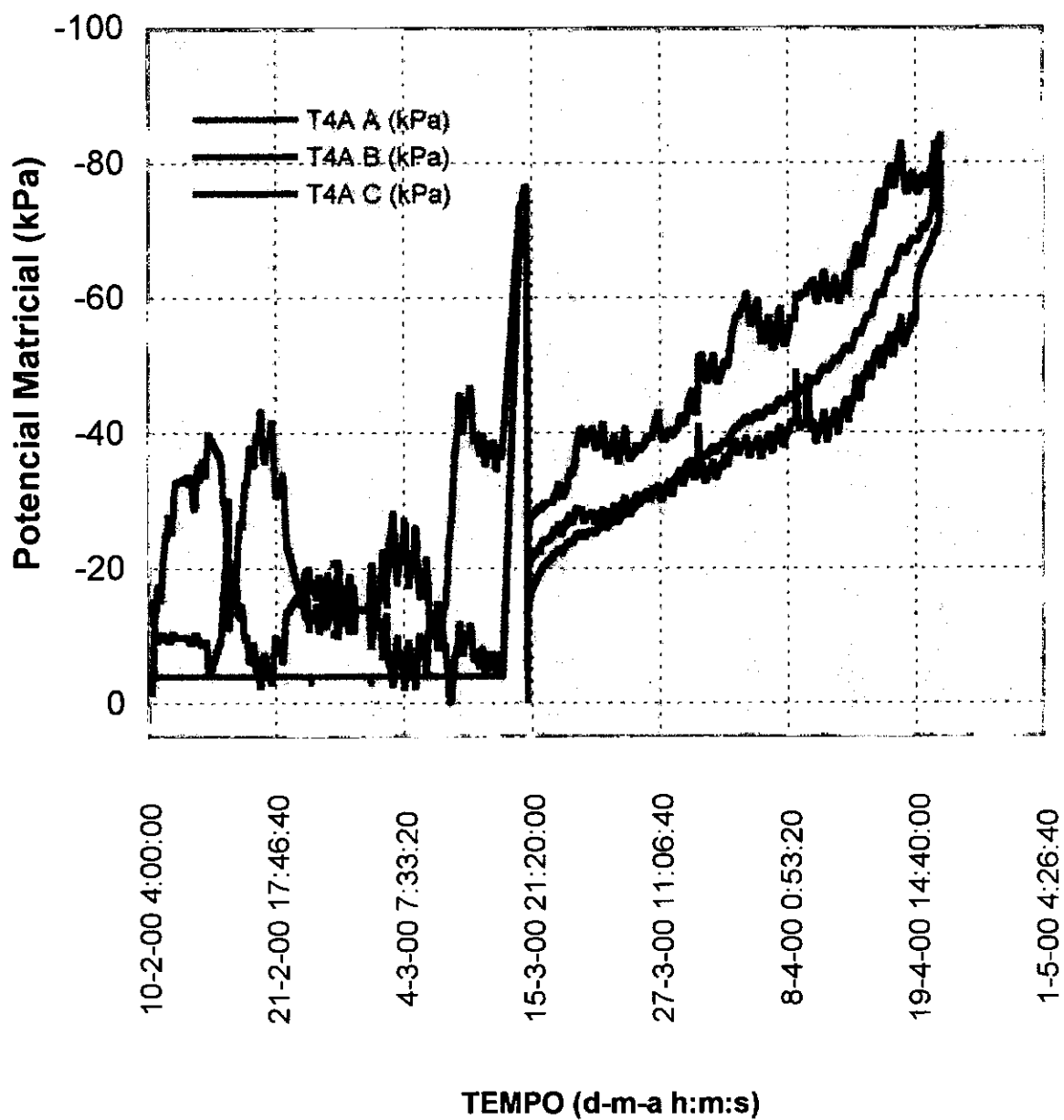


Gráfico 7.6 Comportamento do tensiômetro T4A, medindo o potencial matricial (kPa) ao longo do tempo.

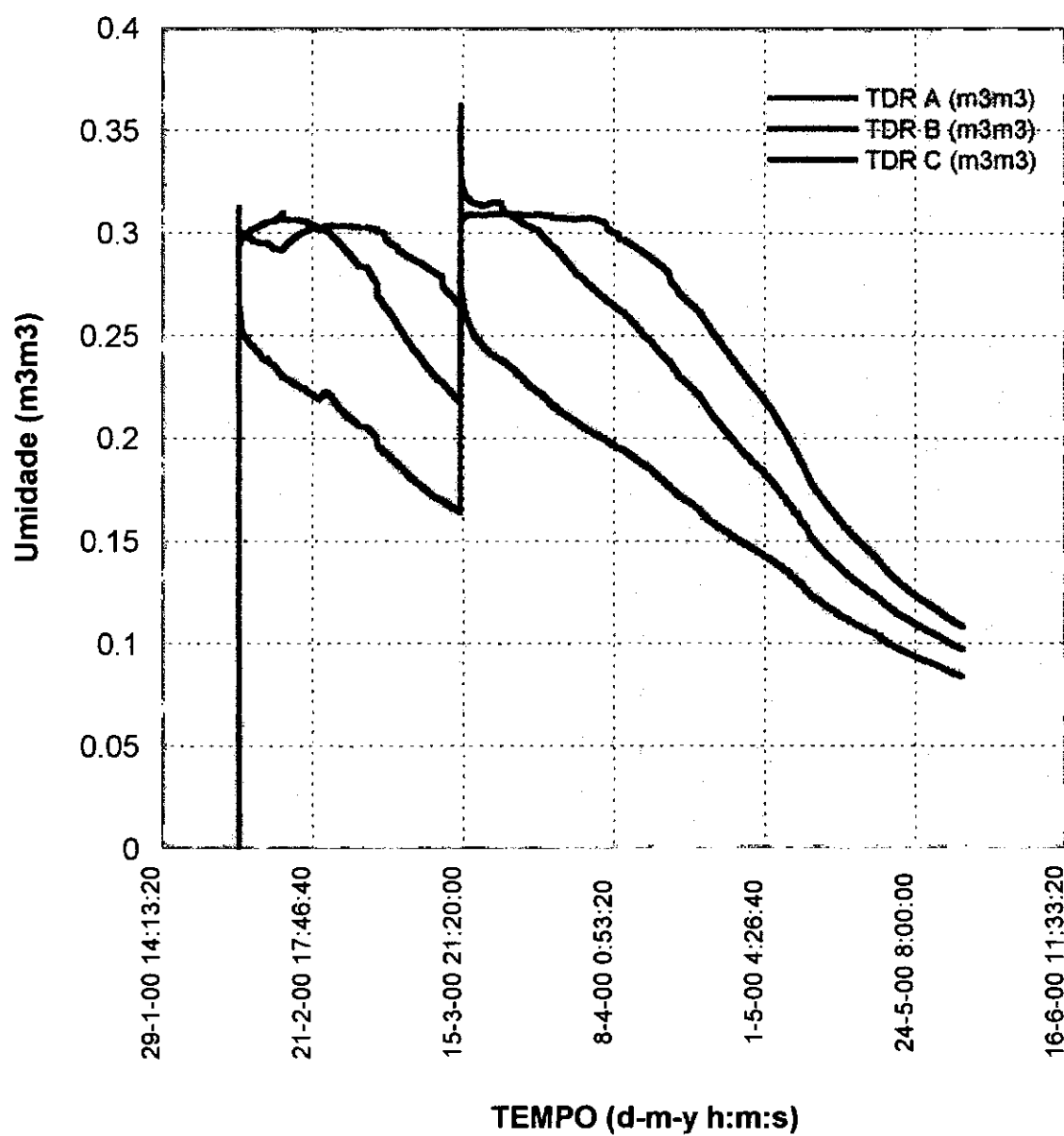


Gráfico 7.7 Comportamento da sonda TDR medindo a percentagem de umidade (%), ao longo do tempo.

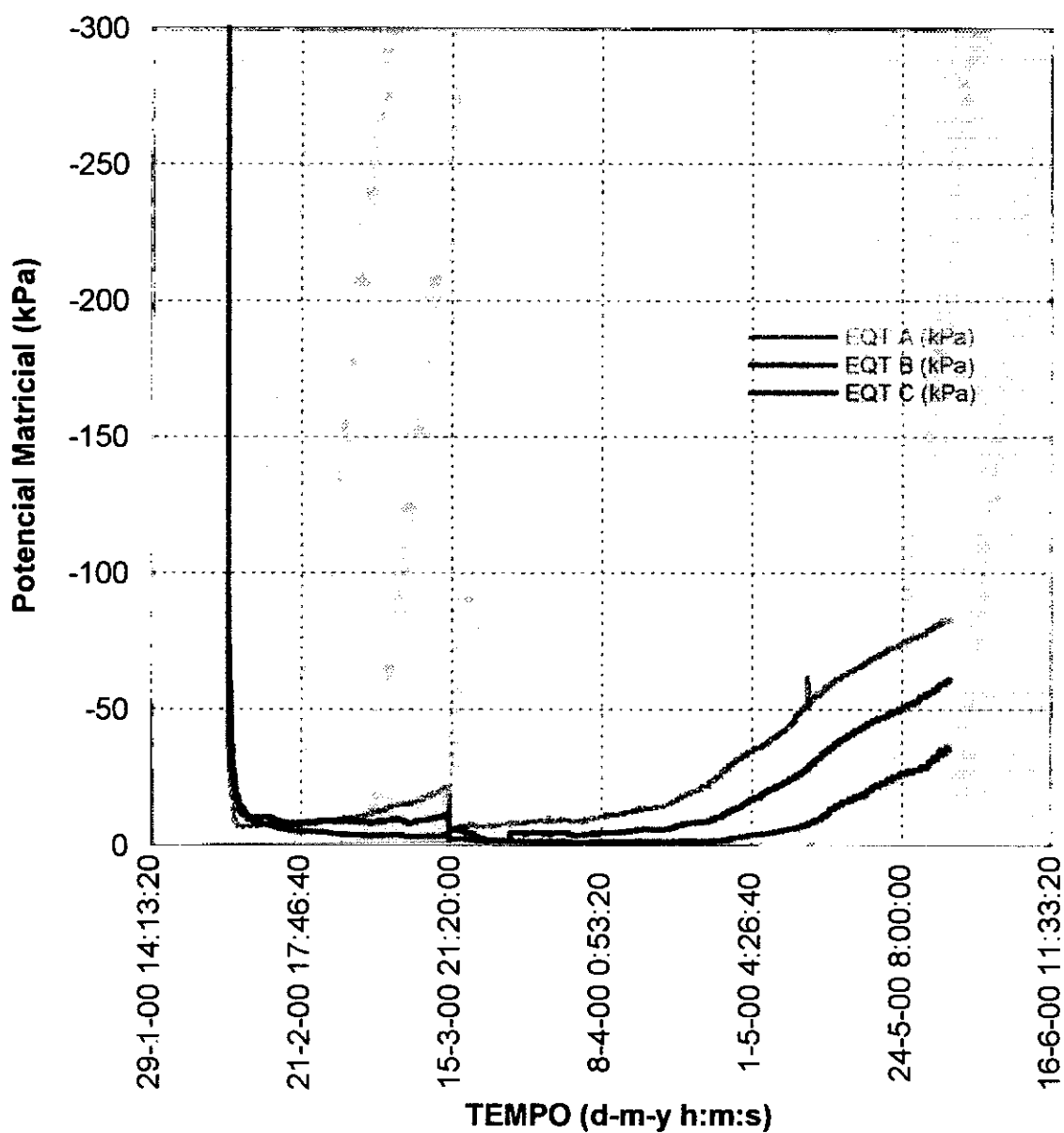


Gráfico 7.8 Comportamento do equitensiômetro medindo o potencial matricial (kPa) ao longo do tempo.

equitensiômetro, essas hastes estão envolvidas em uma cápsula porosa, esperava-se que o tempo de resposta fosse bastante semelhante a sonda TDR (Gráfico 7.9). Entretanto sabe-se que o tempo de resposta o equitensiômetro tem maior acurácia entre -100 a -1000 kPa. Ensaio feitos paralelamente aos ensaios de saturação e drenagem, onde foram introduzidos alguns equitensiômetros em água, retirando-os em seguida, e submetendo-os ao calor de uma lâmpada, para determinar o tempo de resposta individual de cada instrumento. Esses ensaios indicaram que o intervalo entre o estado de saturação e o de sucções elevadas, nessas condições, foi de aproximadamente 48 horas.

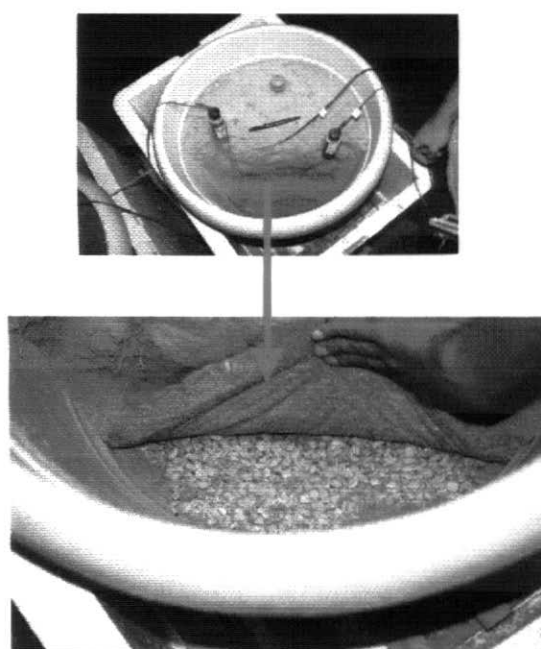


Figura 7.5 Detalhe do sistema de drenagem nos mini-liímetros, composto de geotextil BIDIM e de brita zero.

No início dos ensaios, o equitensiômetro foi primeiro instrumento a ser colocado nos tanques mini-lisímetros. Os resultados obtidos nesse período foram satisfatórios (Gráfico 7.8), levando a acreditar que o instrumento respondeu a sucções de -1000 kPa. Porém, no decorrer do tempo, essa certeza foi descartada, considerando-se que três meses após o segundo ensaio, quando o solo encontrava-se praticamente seco, os valores de sucção não ultrapassaram -300 kPa. A hipótese de haver algum erro na configuração de *data logger*, também foi descartada, pois logo que os tensiômetros pararam de registrar,

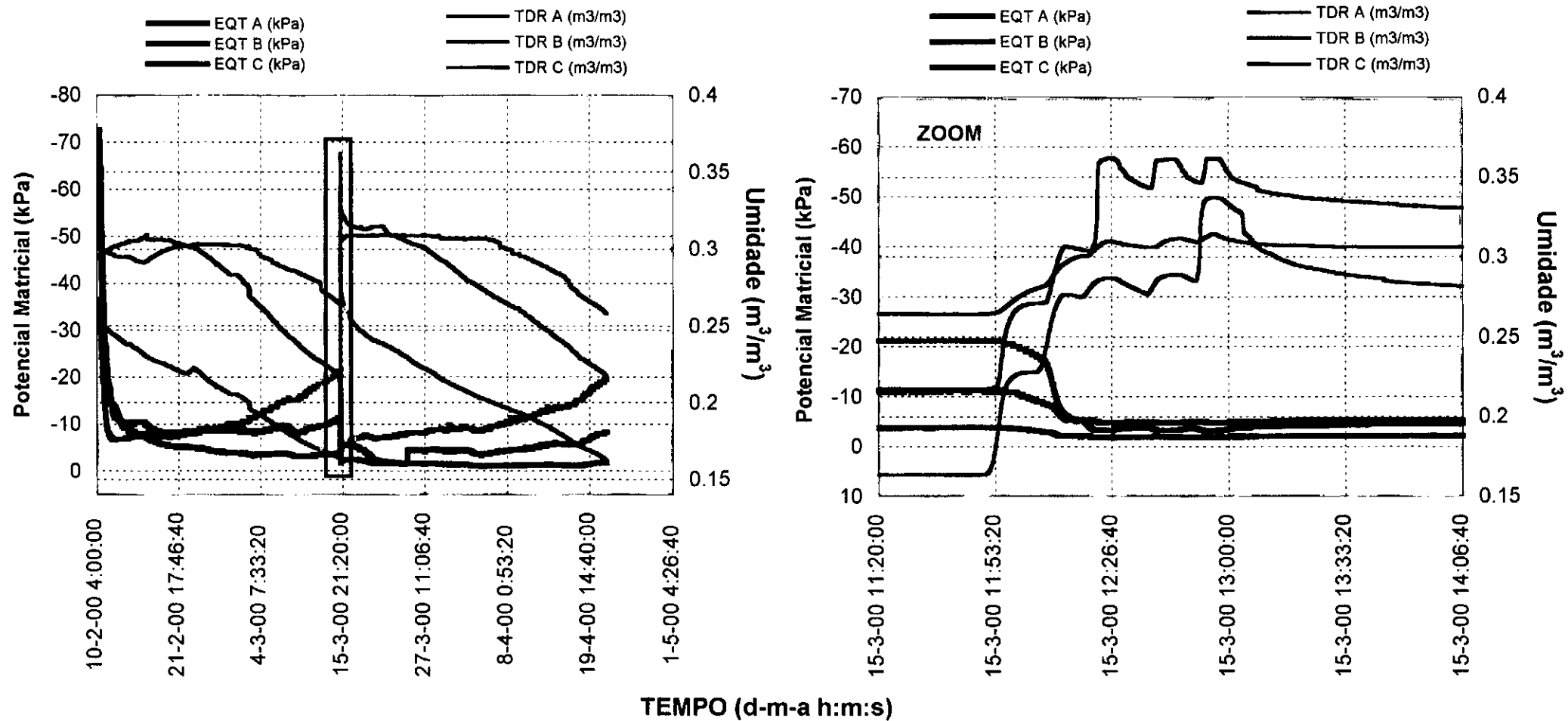


Gráfico 7.9 Comparação do equitensiômetro medindo o potencial matricial (kPa), com a sonda TDR medindo a percentagem de umidade (%) e seus comportamentos detalhados.

estes foram retirados dos mini-lisímetros, substituídos por outros equitensiômetros que não haviam sido instalados. As leituras desses instrumentos foram então feitas através de multímetros digitais diariamente, apresentando dados próximos aos adquiridos pelos instrumentos que estavam conectados ao *data logger*.

Os resultados apresentados através do método do papel filtro durante os ensaios de saturação e drenagem (Gráfico 7.10), não tiveram uma diferença significativa comparando-se aos dados obtidos por MARINHO (1994), ou seja, em condições de baixas sucções, -80kPa, o método mostrou-se pouco eficiente, entretanto, levando-se em conta que o solo apresentava uma textura arenosa, uma ausência de plasticidade (descrito no item 7.1.4), uma sucção limitada, em decorrência da macroporosidade acentuada, características essas que limitaram a utilização da técnica do papel filtro nessa classe de solo, já observadas por CHANDLER & GUTIERREZ (1986).

Das amostras submetidas aos tratamentos de tempo de equilíbrio entre o disco de papel filtro e o solo, considerando de sete em sete dias, e como de quinze em quinze dias, somente os dados obtidos entre o período de quinze em quinze dias, foram significativos, apesar de MARINHO (1994) apresentar dados de intervalo de equilíbrio entre amostras de papel filtro e o solo, em intervalos de cinco em cinco dias. Além disso, a técnica mostrou-se requerer bastante habilidade, uma certa precisão e “higiene”, principalmente no momento da retirada e colocação das amostras de papel filtro.

Os dados obtidos pelo geotermômetro (Gráfico 7.11). não foram significativos ao ponto de comprometerem o comportamento do tensiômetro automatizado. Segundo LOVERY *et al* (1999), tal fato seria comprometedor em apenas temperaturas acima de 50 °C. Embora, mesmo sabendo-se que em certos ambientes não oferecem essas condições de temperatura superiores a 50 °C, e que desse modo não se justificaria a utilização do geotermômetro, a funcionabilidade deste instrumento mostrou-se bastante importante em conjunto com outros sensores de solo, sendo necessária a sua presença quando se pretende trabalhar com tensiômetros constituídos de transdutores de pressão em situações de campo.

Os resultados de temperatura do solo obtidos pelo geotermômetro, comparando-se com os dados obtidos pelo termo-higrógrafo (Gráfico 7.12) instalado próximo aos mini-lisímetros, mostraram-se bastante significativos no entendimento da passagem da água dos poros do solo nos mini-lisímetros, para atmosfera do laboratório, caracterizando-se por

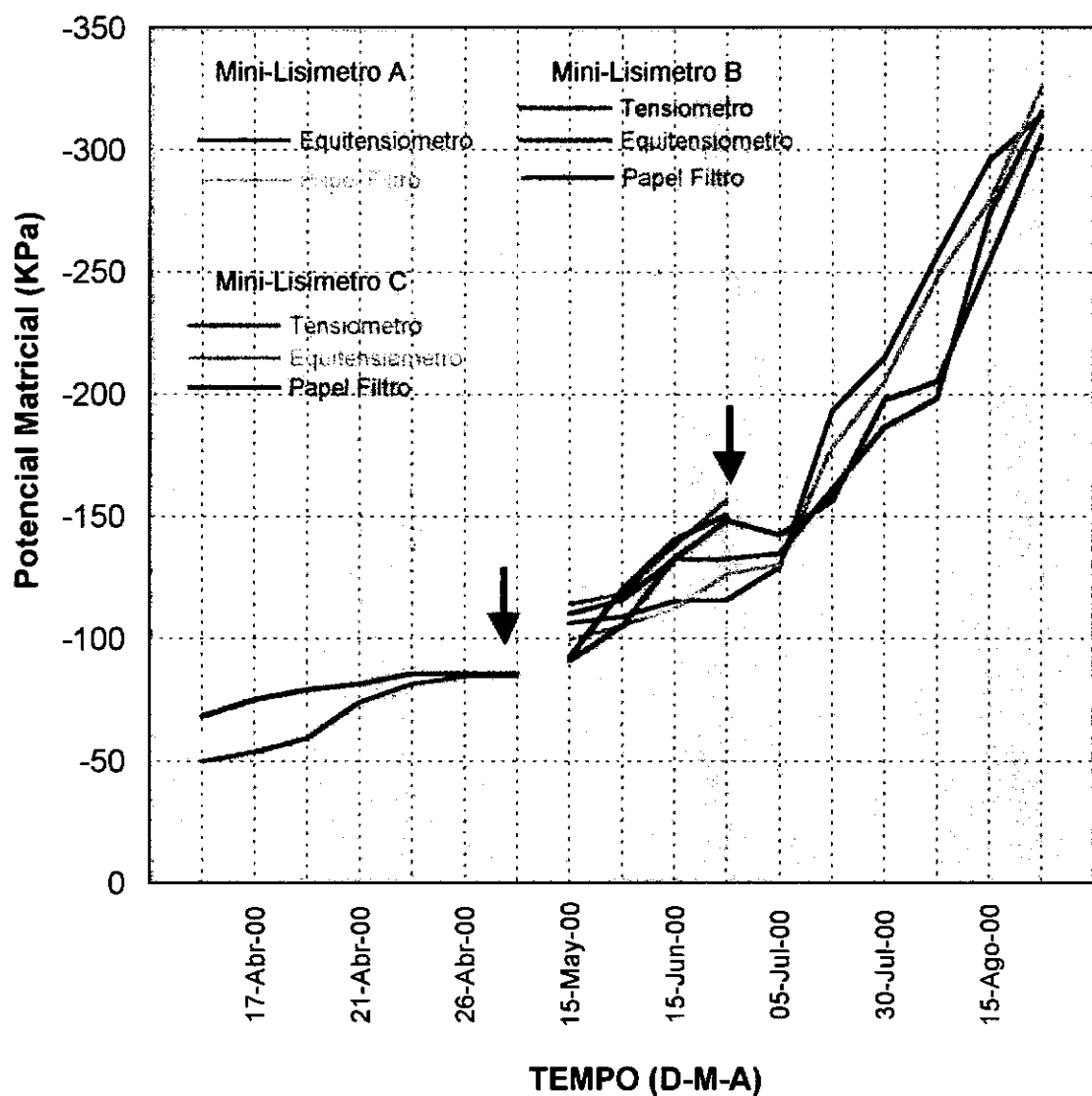


Gráfico 7.10 Comparação do comportamento do tensiômetro, do equitensiômetro e do papel filtro em kPa ao longo do tempo.

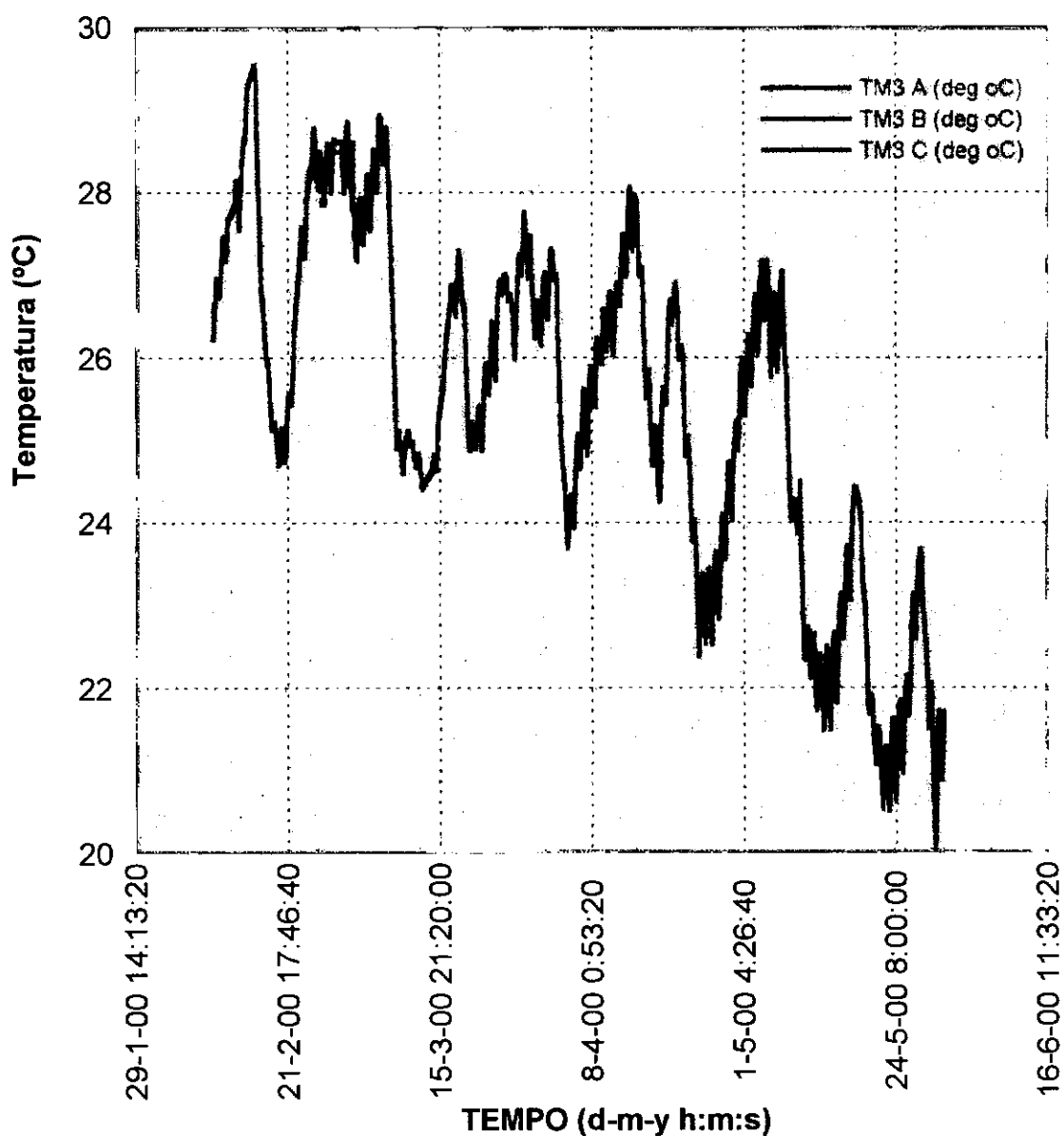


Gráfico 7.11 Comportamento do geotermômetro, medindo a temperatura do solo em graus °C ao longo do tempo.

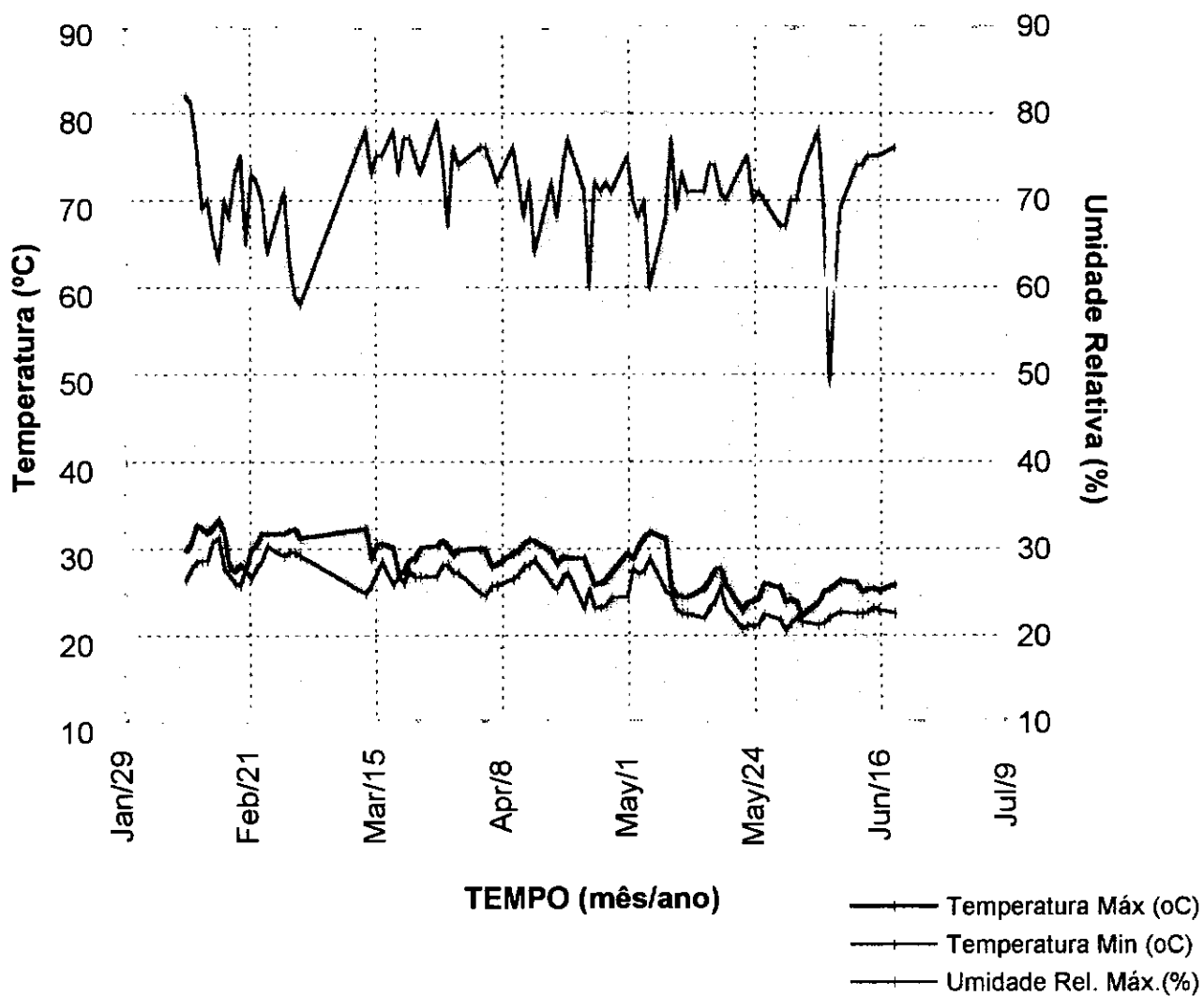


Gráfico 7.12 Comportamento da temperatura ambiente em °C e da umidade relativa em %.

processos de evaporação do solo. No início do processo de saturação, quando efetuou-se a irrigação nos mini-lisímetros, a diferença entre umidade relativa do ar antes e depois do ensaio, foi de 3 %, passando de 75 para 78 %, no primeiro ensaio realizado em fevereiro, e 64 para 67 %, no segundo ensaio de saturação e drenagem.

Os dados obtidos pela comparação da temperatura no interior do solo com a temperatura ambiente, variaram em torno de ± 3 °C de diferença. Deve-se considerar que o geotermômetro obteve dados contínuos de temperatura do solo, enquanto que o termohigrógrafo, registrou somente dados diários de máxima e mínima temperatura e umidade de ar.

No Gráfico 7.13 são apresentados o comportamento do geotermômetro em confronto com a sonda TDR e com o tensiômetro automatizado. Houve uma variação nas mensurações da umidade do solo e do potencial matricial, em relação a temperatura do solo, porém esta não foi momentânea. Observou-se que as mensurações do tensiômetro foram mais expressivas em relação as variações de temperatura do solo do que a sonda TDR. Os “picos” de maior temperatura não coincidiram com os picos de maior sucção. Houve uma variação de tempo para que isso ocorresse. Esse efeito é conhecido como “Lagtime”. Em condição de campo, este intervalo é influenciado pela temperatura, bem como por outras variáveis edafoclimáticas interagidas .

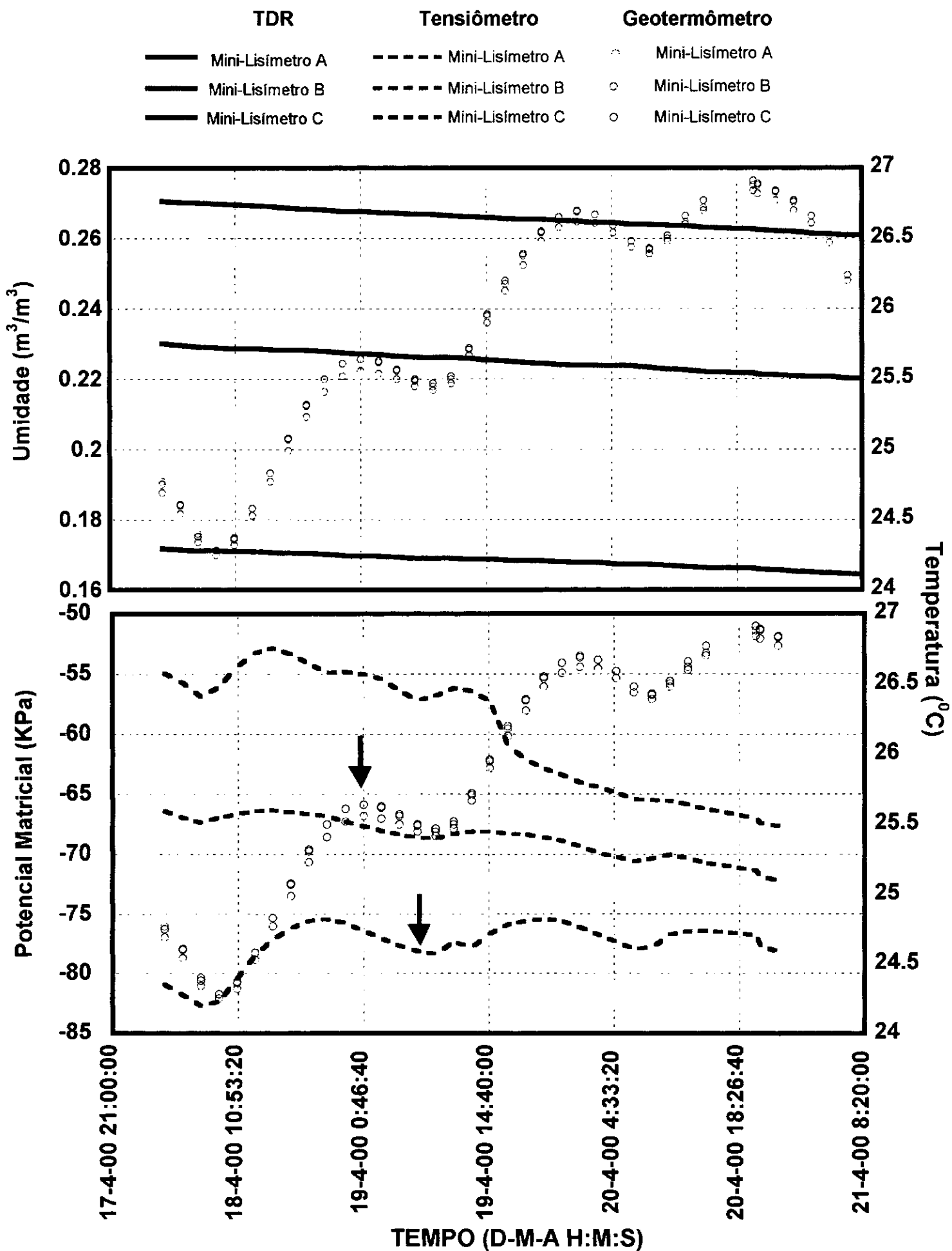


Gráfico 7.13 Comparação do comportamento do geotermômetro, medindo a temperatura do solo em graus $^{\circ}\text{C}$, com o TDR, em umidade (m^3/m^3) e o tensiômetro, em kPa, ao longo do tempo.

8. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos pelos instrumentos foram bastante satisfatórios. Pelo fato de serem automatizados, com exceção do papel filtro, apresentaram de forma geral alta sensibilidade e acurácia no fornecimento de respostas. Em linhas gerais chegou-se às seguintes conclusões:

- O sistema de drenagem composto pelo geotextil BIDIM e pela brita zero colocados nos mini-lisímetros, mostrou-se bastante eficiente no processo de drenagem, restando as partículas de solo "arrastadas" para baixo, evitando que essas pudessem entupir os furos de saída d'água localizados na parte inferior dos mini-lisímetros;
- O sistema de aquisição e armazenamento de dados interfaceado aos instrumentos automatizados, funcionou de forma bastante eficiente registrando os dados medidos pelos instrumentos instalados nos mini-lisímetros, para sucção matricial, umidade volumétrica e temperatura do solo em °C;
- Dos instrumentos utilizados para mensurar a sucção do solo, tensiômetro, equitensiômetro e papel filtro, o tensiômetro foi o que apresentou uma resposta mais rápida, fornecendo valores em uma fração de segundos em seguida aos eventos de saturação e drenagem, que fizeram parte dos ensaios propostos na pesquisa;
- De forma geral, os resultados apresentados através do uso do papel filtro e equitensiômetros não foram satisfatórios. Durante o emprego destas duas alternativas de medição de sucção observou-se a importância dos cuidados no caso do papel filtro na instalação do mesmo no mini-lisímetro e em sua retirada, que podem sob certos aspectos serem associados à experiência do técnico. Da mesma forma, com relação ao equitensiômetro, para que um bom contato entre o solo e o equitensiômetro seja garantido diversos cuidados tem que ser tomados quando de sua instalação. Os resultados obtidos com estes equipamentos na fase inicial de sua utilização, aparentemente são de questionamento maior do que na fase final, o que no caso do papel filtro pode conforme observado estar associado ao amadurecimento do técnico / pesquisador e no caso do equitensiômetro ao movimento da água no solo que carregou partículas menores e melhorou o contato equitensiômetro-solo e conduzindo a resultados mais coerentes.

- A estratégia dos mini-lisímetros adotada nesta pesquisa mostrou-se valiosa, por permitir ao pesquisador controlar o funcionamento global do sistema, ter facilidade e segurança nos passos de correção e adaptação dos equipamentos e do sistema de aquisição, além de permitir uma série de testes necessários antes da implantação em campo dos lisímetros. Além disso, os mini-lisímetros são equipamentos de baixo custo que permitem com facilidade estudos de desenvolvimento de novos equipamentos e do fluxo de água ou outros solutos através do solo.

8.1 Sugestões Para Pesquisas Futuras

Tendo em vista as dificuldades encontradas no desenvolvimento deste trabalho, que compreenderam essencialmente aspectos referentes aos mini-lisímetros, bem como aos equipamentos empregados e os resultados obtidos, propõe-se aqui como continuação da pesquisa e para atividades futuras o seguinte:

1. Repetição dos ensaios em mini-lisímetros colocando os equipamentos a duas profundidades para observar e analisar o fluxo da água através do solo;
2. Realização de ensaios em mini-lisímetros com equitensiômetros instalados a diferentes profundidades, em posição horizontal, inclinada e vertical, com procedimentos especiais de instalação dos equitensiômetros para garantir contato entre os mesmos e o solo;
3. Realização em mini-lisímetros de medidas de sucção com papel filtro, variando o tamanho do tubo e a forma de disposição do mesmo, com comparação com resultados de outros equipamentos;
4. Realização de ensaios em mini-lisímetros com cobertura dos mesmos com capa plástica para diminuir o efeito da evaporação;
5. Realização dos mesmos ensaios a profundidades diferentes com mini-lisímetros de maiores dimensões (90 cm de base e 120 cm na boca superior),
6. Ensaio com papel filtro em mini-lisímetros com diferentes sistemas de colocação do papel filtro, visando medidas da sucção total e da sucção matricial;
7. Desenvolvimento de tensiômetros automáticos que permitam a medida de sucções com valores acima de 100 kPa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOUKHALED, A.; ALFARO, J. F.; SMITH, M., 1986. "Los Lisímetros". Organización de Las Naciones para la Agricultura y la Alimentación. Estudio (FAO) Riego y Drenaje, nº 39, Rome.
- BAUMGARTNER, N.; PARKIN, G. W.; ELRICK, D. E. 1994. "Soil Water Content and Potential Measured by Hollow Time Domain Reflectometry Probe". *Soil Science American Journal*, vol. 58, pp. 315-318.
- BERNARDO, S., 1995. "Água no Solo". In: Manual de Irrigação, capítulo 1, Viçosa: UFV, Minas Gerais, Imprensa Universitária., 657 p.
- BERTONI, J.; NETO, F. L. & JUNIOR, R. B., 1976. "Estudo em Lisímetros Monolíticos, de Perda de Água e Evapotranspiração em Três Tipos de Solos sob Diferentes Condições de Uso". *Bragantia*, vol. 35(12), pp. 123-145.
- BISCEGLI, C. I.; VAZ, C. M. P.; CRUVINEL, P. E.; et al., 1996. "Outros Equipamentos e Métodos". In: Instrumentação Agropecuária: Contribuições no Limiar do Novo Século, EMBRAPA-SPI, Brasília, pp. 255-262.
- BISHOP, A. W., KEYNARD, M. & PENMAN, A. D. M., 1960. "Pore Pressure Observations at Selset Dam". In: Proceedings on Pore Pressure and Suction in Soils, Butterworths, London, pp. 91-102.
- BLACK, T. A.; THURTELL, G. W. & TANNER, C. B., 1968. "Hydraulic Load-cell Lysimeter, Construction, Calibration and Tests". *Soil Science Society American Journal*, vol. 32, pp. 623-629.
- BRADY, N. C., 1989. "Natureza e Propriedades dos Solos", Tradução, Antonio B. N. Figueredo, 7ª ed., RJ, Ed. Freitas Bastos, 898 p.

- BROWN, S. F., 1996. "Soil Mechanics in Paviment Engineering". *Geotechnique*, vol. 46, pp. 3383-426.
- BUTTERS, G. L. & CARDON, G. E., 1998, "Temperature Effects on Air-Pocket Tensiometers". *Soil Science*, vol. 163(9), pp. 677-685.
- CAMPBELL, C. G.; GHODRATI, M. & GARRIDO, F., 1999. "Comparasion of the Domain Reflectometry, Fiber Optic Mini-Probes and Solution Samplers for Real time Measurement of Solute of Solute Transport in Soil". *Soil Science*, vol. 164(3), pp. 156-170.
- CARNEIRO, B. J. I. & CONCIANI, W., 1997. "Emprego do TDR para Acompanhar a Evolução da Infiltração de Água no Solo". In: 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, ÑSAT'97, Rio de Janeiro, Ed. Abril, pp. 215-220.
- CASSEL, D. K. & KLUTE, A., 1986. " Water potential: Tensiometry. Methods of soil. Physical and mineralogical methods". *American Society of Agromy*, nº 9, pp. 565-596.
- CASSEL, D. K.; KACHANOSKI, R. G. & TOPP, G. C., 1994. "Practical Considerations for Using a TDR Cable Tester". *Soil Technology*, vol. 7, pp. 113-126.
- CHANDLER, R. J. & GUTIERREZ, I. C., 1986. "The Filter-Paper Method of Suction Measurement". *Geotechnique*, vol. 36(12), pp. 265-268.
- CRESTANA, S. & POSADA, A. N., 1997, "Dinâmica da Água e de Solutos na Região Não-Saturada do Solo: Modelagem Determinística e Estocástica". In: 3º Encontro Científico dos Pós-Graduandos do CENA/USP, 26p, Picacicaba, São Paulo, Novembro.

- CRILLY, M. S., SCHREINER, H. D. & GOURLEY, C. S., 1991. "A Simple Field Suction Measurement Probe". *Geotechnics in the African Environment, Proceedings of the Tenth Regional Conf. for Africa on Soil Mechanics & Foundation. Engineering.*, Maseru, pp. 291-298.
- DALTON, F. N. & GENUCHTEN, M. T., 1986. "The Time Domain Reflectometry Method for Measuring Soil Water Content and Salinity". *Geoderma*, vol. 38(1,4), pp. 237-250.
- DELTA-T DEVICES, 2000. "Instruments for Environmental and Industrial Measurement", <http://www.delta-t.co.uk>
- ELDREDGE, E. P.; SHOCK, C. C. & STIEBER, T. D., 1993. "Calibration of Granular Matrix Sensor For Irrigation Management". *Agronomy Journal*, nº 85, pp. 1228-1232.
- EVETT, S. R.; WARRICK, A. W. & MATTHIAS, A. D., 1995. "Wall and Capping Effects on Microlysimeter Temperatures and Evaporation". *Soil Science Society American Journal*, vol. 59, pp. 329-336.
- FAO, 2000. "Food and Agriculture Organization", <http://www.fao.org>
- FELLNER-FELDEGG, H., 1969. "The Measurement of Dielectric in the Time Domain". *Journal of Physical-Chemical*, vol.73, pp. 616-623.
- FERNANDES, N. F.; COELHO NETTO, A. L. & DEUS, E. C., 1989. "Monitoramento dos Fluxos D'água no Solo: Instrumentação Alternativa". In: *Simpósio de Geografia Física e Aplicada*, Nova Friburgo, RJ, pp. 71-97.
- FERRÉ, P. A.; RUDOLPH, D. L. & KACHANOSKI, R. G., 1998. "Water Content Response of a Profiling Time Domain Reflectometry Probe". *Soil Science Society American Journal*, vol. 62, pp. 865-873.

- FLEMING, P. M., 1993. "Desenvolvimento de um Sistema Tensiométrico Automático para a Medição de Poro Pressões em Encostas Não Saturadas". Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ., 180 p.
- FREDLUND, D. G. & RAHARDJO, H., 1993. "Soil Mechanics for Unsaturated Soils". New York, USA, John Wiley & Sons, Inc., 517 p.
- GARBULEWSKI, K. & ZAKOWICS, S., 1997. "Aplication of TDR Technicque for Compaction Control of Engineered Fills". *Proceeding of the XIV Conference on Soil Mechanics and Foundation Engeering*, Hamburg, DE, vol. 1.
- GARDNER, R., 1937. "A Method of Measuring the Capillary Tension of Soil Moisture Over a Wide Moisture Range". *Soil Science*, vol. 43, 01-06, pp. 227-83.
- GERMANN, P. F.; DIPIETRO, L. & SINGH, V. P., 1997. "Momentun of Flow in Soils Assessed With TDR-Moisture Readings". *Geoderma*, vol. 80, pp. 153-168.
- GÖTTLEIN, A; HELL, U. & BLASEK, R., 1996. "A System for Microscale Tensiometer and Lysimeter". *Geoderma*, vol. 69, pp. 147-156.
- GOURLEY, C. C. & VERTAMATTI, E., 1994. "A New Device for in Situ Measurement of Soil Suction". X COBRAMSEF, Foz do Iguaçu, vol. 2, pp. 351-358.
- GOURLEY, C. C. & SCHREINER, H. D., 1995. "Field Measurement of Soil Suction". *Proceedings of the first International Conference on Unsaturated Soils*, Paris, France, vol. 2, pp. 601-607.
- GROHMANN, F.; MEDINA, H. P.; KÜPPER, A & GARGANTINI, H., 1951. "Novo Tipo de Lisímetro Monolítico". *Bragantia*, vol. 11, pp. 333-335.

- GUAN, Y. G. & FREDLUND, D. G., 1996. "Use of the Tensile Strength of Water for the Direct Measurement of High Soil Suction". Presented for the Canadian Geotechnical Journal for Review, June.
- HART, G. L. & LOWERY, B., 1998. "Measuring Instantaneous Solute Flux and Loading with Time Domain Reflectometry". *Soil Science Society American Journal*, vol. 62, pp. 23-35.
- HEIMOVAARA, T. J.; FOCKE, A. G.; BOUTEN, W. & VERSTRATEN, J.M., 1995. "Assessing Temporal Variations in Soil Water in Soil Water Composition With Time Domain Reflectometry". *Soil Science Society American Journal*, vol. 59, pp. 689-698.
- HILLEL, D., 1982. "Fundamentals of Soil Physics". Academic press, San Diego, California, 413 p.
- HUBBELL, J. M. & SISSON, J. B., 1996. "Portable Tensiometer Use in Deep Boreholes". *Soil Science*, vol. 161(6), pp. 481-483.
- HUBBELL, J. M. & SISSON, J. B., 1998. "Advanced Tensiometer for Shallow or Deep Soil Water Potential Measurements". *Soil Science*, vol. 163(4), p. 271-277.
- KACHANOSKI, R. G.; PRINGLE, E. A. & WARD, A., 1990. "Field Measurements of Solute Travel Times Using Time Domain Reflectometry". *Soil Science Society American Journal*, vol. 56, pp. 47-52.
- KIM, D. J.; VANCLOOSTER, M.; FEYEN, J. & VEREECKEN, H., 1998. "Simple Linear Model for Calibration of Time Domain Reflectometry Measurements on Solute Concentration". *Soil Science Society American Journal*, vol. 62, pp. 83-89.
- LACERDA, W. A.; MAHLER, C. F. & FERREIRA, S. R. M., 1997. "Ensaio de Campo para Determinação das Propriedades de Solo Não Saturado". In: 3o Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Rio de Janeiro, RJ, pp. 505-536.

- LARROSA, C. G.; BELLINI, J. A. & PRATA, A. T., 1995. "Medição do Conteúdo de Umidade de Solos Artificiais Usando a Técnica de Reflectometria no Domínio do Tempo". Resumo do Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. pp. 2-13.
- LIBARDI, P. L., 1995. "Dinâmica da Água no Solo", 1ª ed, Piracicaba, São Paulo, Editora ESALQ/USP, 497p.
- LIMA, V. L. A. , 1998. "Efeitos da Quantidade de Água de Irrigação e da Fração de Lixiviação Sobre a Cultura de Feijoeiro em Condições de Lisímetro de Drenagem. Tese de D. Sc., Universidade de Viçosa, Viçosa, MG, 87 p.
- LIU, Y.; BIERCK, B. R. & SELKER, J. S.; et al., 1993. "High Intensity X-Ray and Tensiometer Measurements in Rapidly Changing Preferential Flow Fields". *Soil Science Society American Journal*, vol. 57, pp. 1188-1192.
- LOWERY, B., 1999. "Influência da Temperatura na Medida do Potencial Mátrico da Água no Solo com Tensiômetro de Câmara de ar". In: *XXVII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, CD-ROM, Brasília.
- MAHLER, C. F. & DIAS de OLIVEIRA, L. C., 1997. "Determinação da Sucção Total in situ de Solo Poroso de São Paulo Através do Método do Papel Filtro". In: 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Rio de Janeiro, RJ, pp. 551-556.
- MAHLER, C. F.; KLEIN, M.; MATTHIES, M. & TRAPP, S., 1996. "Soil Water Dynamics in Central Europe and Brazil", Report COPPE/UFRJ & IUSF/ Uuni-Osnabrüc, 01/1996.
- MAHLER, C. F., 1998. Notas de Aulas, Mecânica dos Solos Não Saturados, Programa de Engenharia Civil, Coordenadoria dos Programas de Pós graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

- MALLANTS, D.; VANCLOOSTER, D.; MEDDANI, M. & FEYEN, J., 1994. "Estimating Solute Transport in Undisturbed Soil Columns Using Time Domain Reflectometry". *Journal of Contaminant and Hydrology*, vol. 17, pp. 91-109.
- MALLANTS, D.; VANCLOOSTER, M.; TORIDE, N.; VANDERBORGHT, J.; VANGENUCHTEN, M. Th. & FEYEN, J., 1996. "Comparison of Three Methods to Calibrate TDR for Monitoring Solute Movement in Undisturbed Soil". *Soil Science Society American Journal*, vol. 60, pp. 747-754.
- MARCIANO, C. R.; MORAES, S. O. & SAAD, A. M., et al., 1998. "Variabilidade do Potencial Mátrico e do Conteúdo de Água no Solo em Experimento de Manejo de Irrigação". *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 22, pp. 563-571.
- MARINHO, F. A. M., 1994. "Medição de Sucção com o Método do Papel Filtro". X COBRAMSEF, Foz do Iguaçu, vol. 2, pp. 514-522.
- MARINHO, F. A. M., 1995. "A Técnica do Papel Filtro para Medição da Sucção". Encontro sobre Solos não Saturados, Porto Alegre, RS, pp. 112-125.
- MARINHO, F. A. M. & CHANDLER, R. J., 1995. "Cavitation and the Direct Measurement of Soil Suction". Proceedings of the first International Conference on Unsaturated Soils, Paris, France, vol. 2, pp. 623-630.
- McQUEEN, I. S. & MILLER, R. F. , 1968. "Calibration and Evaluation of a Wide-Range Gravimetric Method for Measuring Moisture Stress". *Soil Science*, vol. 106(3), pp. 225-31.
- MITCHELL, J. K., 1993. "Fundamentals of Soil Behavior". 2ª ed., John Wiley & Sons, Inc., 437 p.
- MOSIER, A. R.; MEYER, W. S. & MELHUSH, F. M., 1986. "Effect of Irrigation Method on Recovery of 15N Fertilizer in a Slowly Permeable Clay Soil Cropped with Maize". *Australian Journal Research*, vol. 24, pp. 1-10.

- MUALEN, Y. & FRIEDMAN, S. P., 1991. "Theoretical Prediction of Electrical Conductivity in Saturated and Unsaturated Soil". *Water Resources Research*, vol. 27, 2771-2777.
- MUSGRAVE, G. W., 1935. "A Device for Measuring Precipitation Waters Lost From the Soil as Surface Runoff, Percolation, Evaporation, and Transpiration". *Soil Science*, vol. 40, pp. 391-401.
- NASCIMENTO, R. A. M., 1998. "Fundamentos da Ciência do Solo". Apostila de Aula, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, 122p.
- NETO, M. D. A., 1994. "Métodos de Medição da Água no Solo: Uma Breve Discussão". *Genomos*, vol. 2(2), pp. 51-61.
- NISSEN, H. H.; MOLDRUP, P. & HENRIKSEN, K., 1998. "High-Resolution Time Domain Reflectometry Coil Probe for Measuring Soil Water Content". *Soil Science Society American Journal*, vol. 62, 1203-1211.
- NISSEN, H. H.; MOLDRUP, P. & HENRIKSEN, K., 1998. "Time Domain Measurements of Nitrate Transport in Manure-Amended Soil". *Soil Science Society American Journal*, vol. 68, pp. 99-100.
- NOBORIO, K.; MCLNNES, K. L. & HEILMAN, J. L., 1996. "Measurements of Cumulative Infiltration and Wetting Front Location by Time Domain Reflectometry". *Soil Science*, vol. 161(8), pp. 481-483.
- OHTÉ, N.; TOKUCHI, N. & SUZUKI, M., 1997. "An in Situ Lysimeter Experiment on Soil Moisture Influence on Inorganic Nitrogen Discharge From Forest Soil". *Journal of Hydrology*, vol. 195, pp. 78-98.

- OLIVEIRA, M. W.; GAVA, G. J. C. & BENDASSOLLI, J. A. et al., 1997. "Lixiviação de N ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+$), K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , e Cl^- em um Solo Cultivado com Cana-de-açúcar: Experimento em Laboratório". In: 3º Encontro Científico dos Pós-Graduandos do CENA/USP, Picacicaba, SP, 26 p.
- PERSSON, M. & BERNDTSSON, R., 1998. "Noninvasive Water Content and Electrical Conductivity Laboratory Measurements Using Time Domain Reflectometry". *Soil Science Society American Journal*, vol. 62, pp. 1471-1476.
- POLISELI, P. C. & PREVEDELLO, C. L., 1999. "Avaliação Experimental de um Modelo Numérico para um Processo de Redistribuição da Água no Solo". *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 23, pp. 203-210.
- REECE, C. F., 1998. "Simple Method for Determining Cable Length Resistance in Time Domain Reflectometry Systems". *Soil Science American Journal*, vol. 62, pp. 314-317.
- REICHARDT, K., 1987. "O Solo como um Reservatório de Água". In: A Água em Sistemas Agrícolas, São Paulo, Ed. Manole, capítulo 3, pp. 27-69.
- RIDLEY, A.M. & BURLAND, J.B. , 1993. "A New Instrument for Measuring Soil Moisture Suction". *Geotechnique* , vol. 43(2), pp. 321-324.
- RHOADES, J. D.; MANTEGHI, N. A; SHOUSE, P. J. & ALVES, W. J., 1989. "Soil Electrical Conductivity and Soil Salinity: New formulations and calibrations". *Soil Science Society American Journal*, vol. 53, pp. 433-439.
- ROTH, C. H.; MALICKI, M. A. & PLAGGE, R., 1992. "Empirical Evaluation of the Relationship Between Soil Dielectric Constant and Volumetric Water Content as the Basis for Calibration Soil Moisture by TDR". *Journal of Soil Science*, vol. 43, pp. 1-13.

- SHOCK, C. C., 1998. "Instrumentos para Determinação da Umidade do Solo". In: XXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA, Poços de Caldas, Minas Gerais, cap. 4, pp. 137-149.
- SHOCK, C. C. & BARNUM, J. M., 1994. "Intergration of Granular Matrix Sensor for Soil Water Monitoring into AgriMet and HydroMet". Oregon State University Agricultural Experimental Station, Special Report 936, pp. 169 - 186.
- SCHMIDT, J.P., 1993. "Eine Einführung in Die Hydrologischen Untersuchungen von Waldökosystemen". Fortarchiv 64, pp. 158-163.
- SINGH, P. V.; PAL, D.; VARADE, S. B. & KAR, S., 1987. "Characterization of Drainage Losses of Clay Soil Estimated with Lysimeter and Tensiometer". *Indian Journal of Agricultural Sciences*, vol. 12 (57), pp. 905-908.
- SOUZA, A. P.; FERNANDES, N. F.; CATALDI, M., 1999. "Mensuração do Potencial Matricial Através de Tensiômetros e do GMS: Comparação por Experimentos de Campo e Laboratório". In: XXVII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, CD-ROM, Brasília.
- THURLER, E. R., GOMES, R. & FERNANDES, N. F., 1996. "Infiltração e Drenagem nos Solos da Estação de Agrometeorologia da UFRJ". *Revista Sociedade & Natureza*, vol. 15, pp. 293-297.
- TIMLIN, D. & PACHEPSKY, Y., 1998. "Measurement of Unsaturated Soil Hydraulic Conductivities Using a Ceramic Cup Tensiometer". *Soil Science*, vol. 163(8), pp. 625-635.
- TOPP, G. C.; DAVIS J. L. & ANNAN, A. P., 1980. "Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines". *Water Research*, vol. 16(3), pp. 574-581.

- TOPP, G. C.; DAVIS J. L. & ANNAN, A. P., 1982. "Eletromagnetic Determination of Soil Water Content Using TDR: Applications to Wetting Fronts and Steep Gradients". *Soil Science Society American Journal*, vol. 46, pp.672-678.
- TOPP, G. C.; DAVIS J. L. & CHINNICK, J. H., 1983. "Using TDR Water Content Measurements for Infiltration Studies: Advances in Infiltration". Proceedings of the National Conference on Advances in Infiltration, Chicago, IL. ASAE Publication 11-83. *American Society of Agricultural Engineers*, pp. 231-240.
- TOPP, G. C. & DAVIS, J. L., 1985. "Measurement of Soil Water Content Using Time Domain Reflectometry (TDR) a Field Evaluation". *Soil Science Society American Journal*, vol. 49, pp. 19-24.
- TORRE NETO, A., 1995. "Estudo e Implementação de Um Sistema de Monitoramento Remoto de Variáveis Edafo-Ambientais". Tese de D. Sc., Universidade de São Paulo, Departamento de Física e Informática, São Carlos, 146p.
- UP- GmbH, 2000, Umwetalnalytische Produkte GmbH, <http://www.upmbh.com>
- VANCLOOSTER, M.; MALLANTS, D.; DIELS, J. & FEYEN, J., 1993. "Determination of Local-Scale Solute Transport Parameters Using Time Domain Reflectometry (TDR)". *Journal of Hidrology*, vol. 148, pp. 93-107.
- VACLOOSTER, M.; MALLANTS, VANDERBORGHT, J.; DIELS, J.; VANORSHOVEN, J. & FEYEN, J., 1996. "Determining Convective Lognormal Solute Transport in a Multilayred Sandy Lysimeter Using Time Domain Reflectometry". *Soil Science Society American Journal*, vol. 59, pp. 337-344.
- VIEIRA, S. & HOFFMANN, R., 1989. "Estatística Experimental". Ed. Atlas, São Paulo, 178p.
- VILLAGRA, M. M.; MATSUMOTO, O. M. & BACCHI, O. O. S. et al., 1988. "Tensiometria e Variabilidade Espacial em Terra Roxa Estruturada". *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 12, pp. 205-210.

- WATSON, K. K. & JACKSON, D., 1967. "Temperature Effects in a Tensiometer-Pressure Transducer System". *Soil Science American Journal*, vol. 31, pp. 156-160.
- WEILER, K. W.; STEENHUIS, T. S.; BOLL, J. & KUNG, K. J. S., 1998. "Comparison of Ground Penetrating Radar and Time Domain Reflectometry as Soil Water Sensors". *Soil Science American Journal*, vol. 62, pp. 1237-1239.
- YOUNG, M. H.; WIERENGA & P. J. & MANCINO, C. F., 1996. "Large Weighing Lysimeter for Water Use and Deep Percolation Studies". *Soil Science*, vol. 161(8), pp. 491-501.
- ZEGELIN, S. J.; WHITE, I. & JENKINS, D. R., 1989. "Improved Field for Soil Water Content and Electrical Conductivity Measurements Using Time Domain Reflectometry". *Water Resource Research*, vol. 25(11), pp. 2367-2376.

APÊNDICES

A. Descrição do Local Previsto para Pesquisa

No campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro (Figura I), se encontram instalados dois conjuntos de quatro lisímetros com dimensões de 1,2 m de largura, por 1,2 m de comprimento e 0,80 m de profundidade, considerado de certa forma com dimensões pequenas em relação aos lisímetros normalmente encontrados nos centros de pesquisa. Cada tanque encontra-se conectado a um dreno coletor, o qual recebe o fluido drenado após a percolação, em um determinado tempo, no solo.

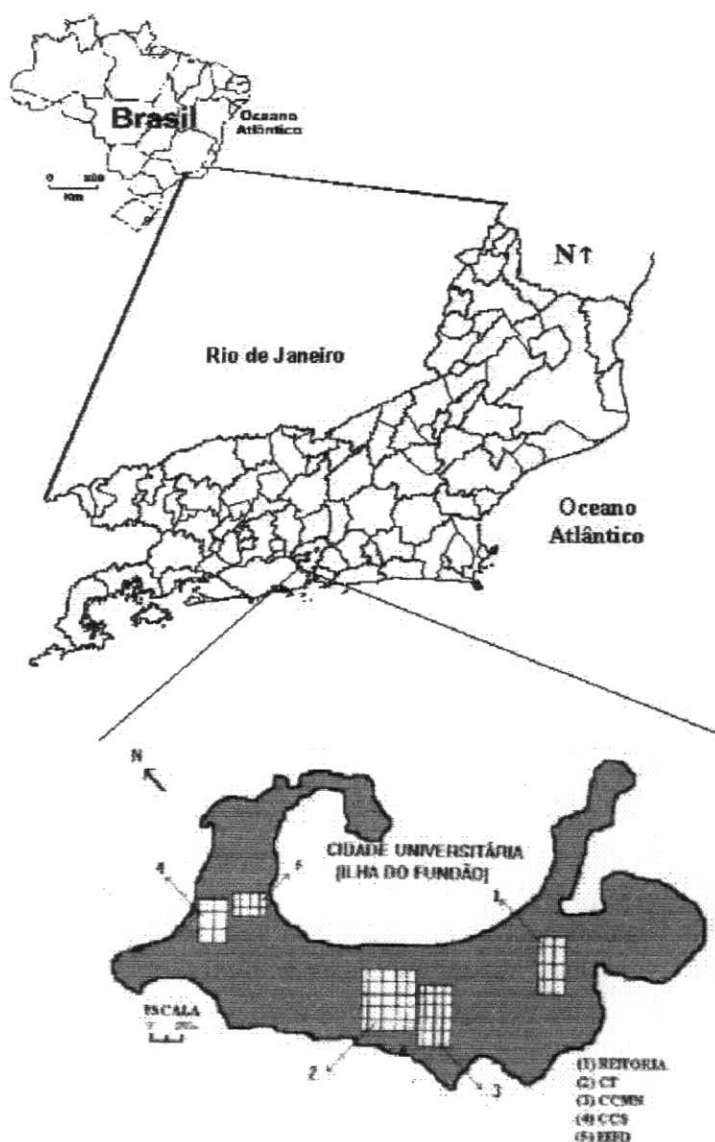


Figura I Esquema ilustrando a localização do campus da UFRJ.

Esses lisímetros estão localizados na Estação Agrometeorológica da UFRJ (Figuras II e III), no Instituto de Geociências, o que constitui uma grande vantagem para os ensaios nesses lisímetros, pois há um completo monitoramento das variáveis climáticas, como o vento, a precipitação, a insolação, a temperatura e umidade do ar, o que é de grande utilidade para as correlações com os processos no interior do solo.



Figura II Vista geral do conjunto de lisímetros, localizados na Estação Agrometeorológica da UFRJ.

Esse equipamento se encontrava, até então, em estado de abandono, não havendo registro de atividade de seu uso. Os lisímetros estavam preenchidos com o solo da Estação Agrometeorológica, que se trata de um solo típico de aterro, com predominância da fração argila, como em quase todo campus universitário, dificultando a caracterização devido à heterogeneidade do material.

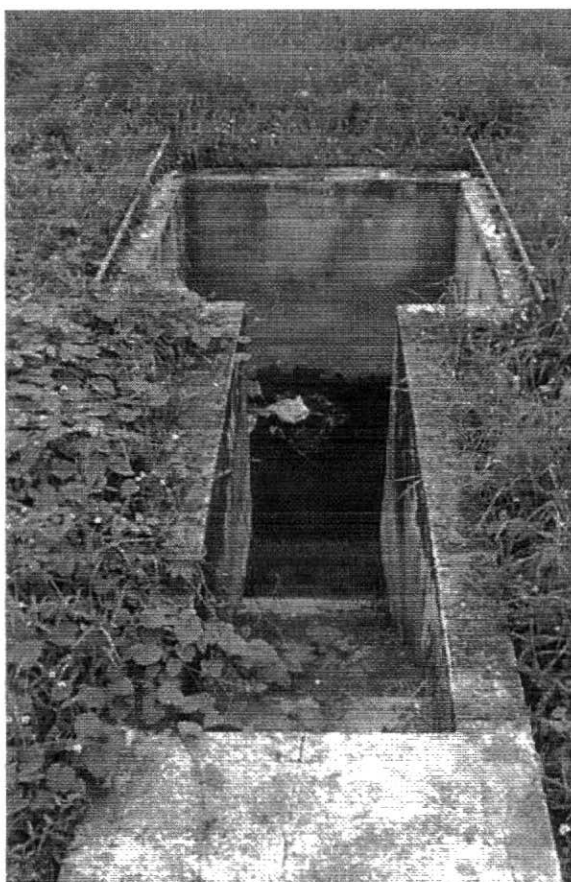


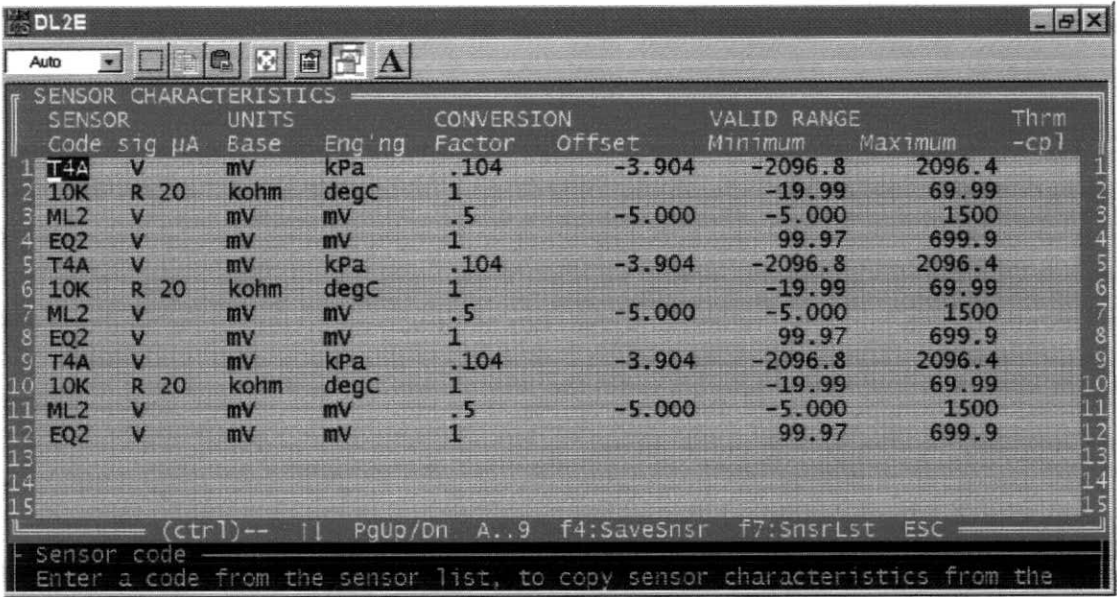
Figura III Vista do Sistema Coletor de fluidos percolados dos Lisímetros localizado na Estação Agrometeorológica no campus da UFRJ.

B. Delta - T Logger DL2e

B.1 Configurações

A “tela” abaixo apresenta as configurações do *software* instalado em PC (486 DX4), em ambiente DOS, usada na interface instrumento – *data logger*.

Os sensores eletrônicos, podem apresentar diferentes princípios de emissão de corrente elétrica. Alguns são projetados para serem “lidos” na forma de voltagem (V), outros na forma de resistência (R). Esses valores são convertidos pelo *data logger*, para as unidades características de cada sensor. Sedo assim, cada sensor apresenta uma configurações específica, principalmente com relação aos fatores de conversão e conversão (*offset*) de sinal:



The screenshot shows the DL2E software window with a menu bar (Auto, icons, A) and a table titled "SENSOR CHARACTERISTICS". The table has columns for Sensor Code, sig, μA , Base, Eng'ng, Conversion Factor, Offset, Valid Range (Minimum, Maximum), and Thrm -cp1. The table lists 12 sensors, with rows 1 through 12 highlighted. At the bottom, there is a status bar with keyboard shortcuts and a prompt to enter a sensor code.

SENSOR CHARACTERISTICS									
SENSOR		UNITS		CONVERSION		VALID RANGE		Thrm	
Code	sig	μA	Base	Eng'ng	Factor	Offset	Minimum	Maximum	-cp1
1 T4A	V		mV	kPa	.104	-3.904	-2096.8	2096.4	1
2 10K	R 20		kohm	degC	1		-19.99	69.99	2
3 ML2	V		mV	mV	.5	-5.000	-5.000	1500	3
4 EQ2	V		mV	mV	1		99.97	699.9	4
5 T4A	V		mV	kPa	.104	-3.904	-2096.8	2096.4	5
6 10K	R 20		kohm	degC	1		-19.99	69.99	6
7 ML2	V		mV	mV	.5	-5.000	-5.000	1500	7
8 EQ2	V		mV	mV	1		99.97	699.9	8
9 T4A	V		mV	kPa	.104	-3.904	-2096.8	2096.4	9
10 10K	R 20		kohm	degC	1		-19.99	69.99	10
11 ML2	V		mV	mV	.5	-5.000	-5.000	1500	11
12 EQ2	V		mV	mV	1		99.97	699.9	12
13									13
14									14
15									15

(ctrl)-- || PgUp/Dn A..9 f4:SaveSnsr f7:SnsrLst ESC

Sensor code
Enter a code from the sensor list, to copy sensor characteristics from the

- Para o Tensiômetro **T4A**, esses dois valores são obtidos de acordo com a calibração deste sensor.
- Para a sonda *Theta* **ML2** e o Tensiômetro de Equivalência – Equitensiômetro **EQ2**, pode-se usar os valores de fator e ajustes de conversão apresentados nos manuais ou os valores obtidos pela curva de linearização.

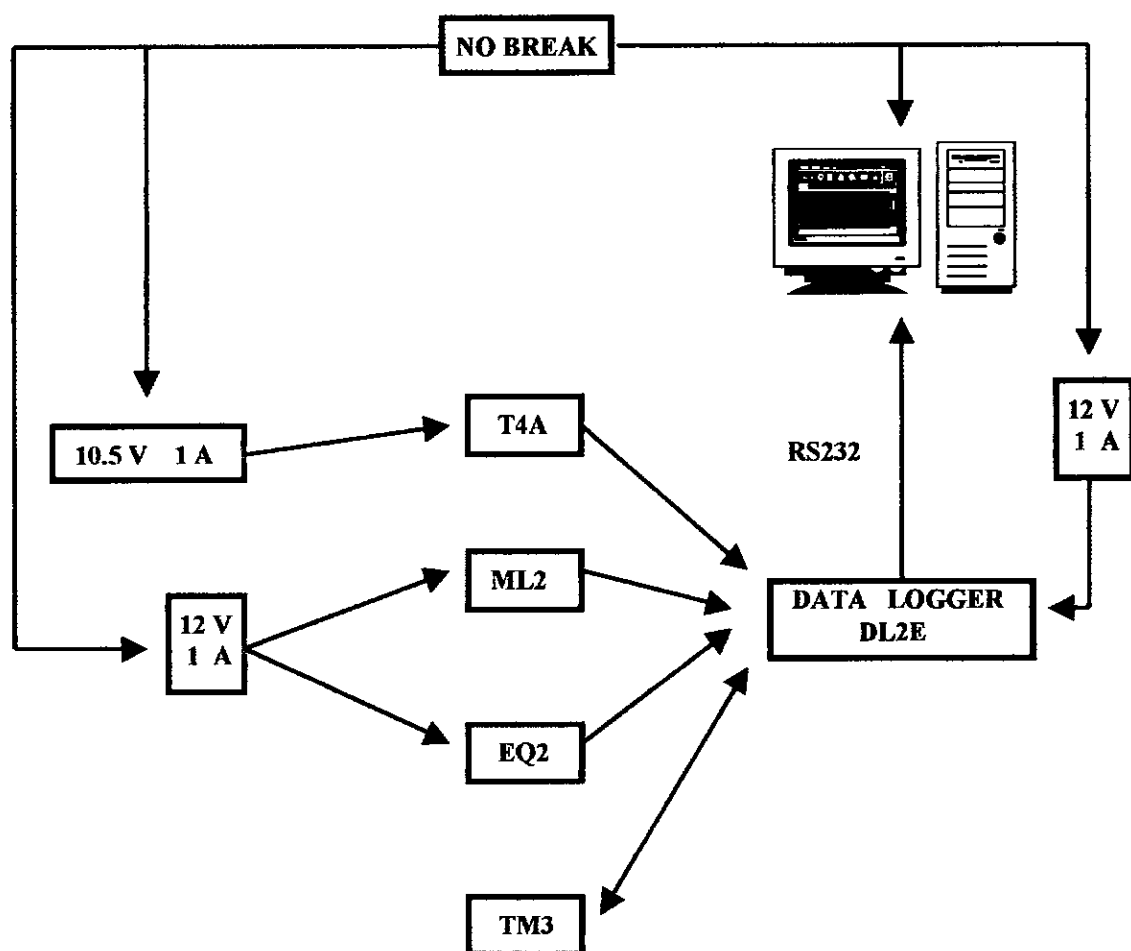
- Para o Geotermômetro (termistor 10 K), a configuração está disponível na lista de sensores incluso no arquivo do *software*. Neste caso deverá entrar somente com o código do sensor (TM3) .

Os intervalos de leitura e a configuração dos canais *relay* (63 ou 64), que funcionam como fonte externa de alimentação (7 a 15 V), bem como os canais contadores (61/62), que funcionam como canais de massa, também deverão ser configurados, para que estejam ativos.

Os dados armazenados pelo *data logger* podem ser transportados para diversas planilhas eletrônicas, como o *Windows Excel*, devendo ser convertido para extensão “.DAT” no momento em que esteja executando o *backup* dos dados. Existem versões mas atualizadas d *software* DL2e, que podem trabalhar em ambiente *Windows* diretamente. Essas versões apresentam muito mais recursos para “tratar” os dados coletados e armazenados, que além exibirem gráficos e diagrama de conexões, o programa todo dispõem de um acesso mais ilustrativo das configurações destes instrumentos.

C. Conexões – Interfaces Instrumentos, *Data Logger* e PC

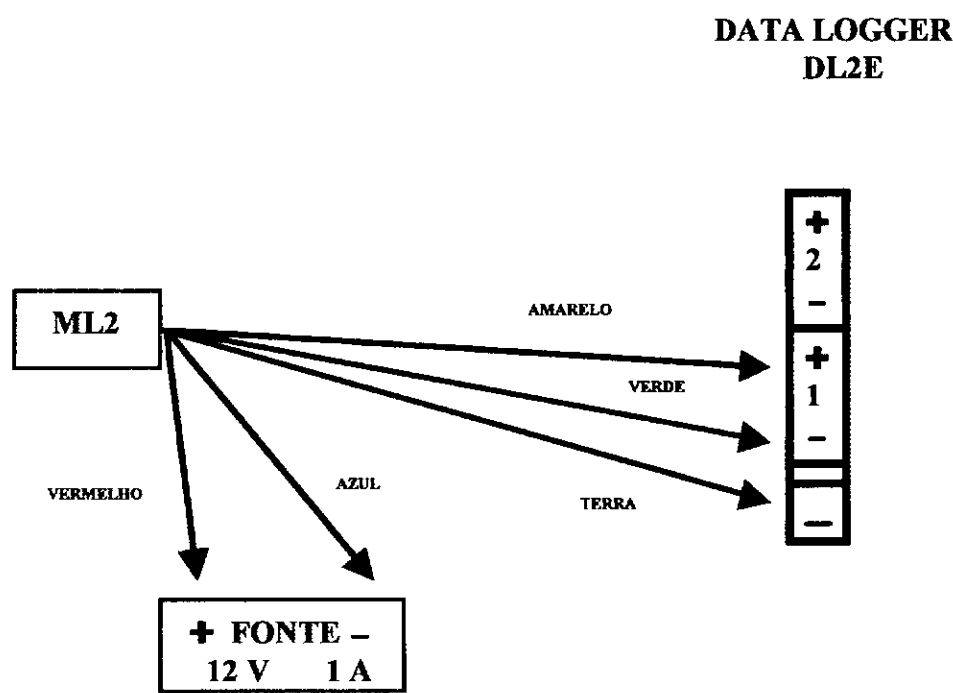
As conexões da Interface Instrumentos, *data logger* e PC, conforme demonstrado no esquema abaixo devem ser feitas com a máxima atenção e segurança, para evitar danos nos equipamentos, além de comprometer os resultados esperados. Aqui estão dispostos os esquemas de instalação dos instrumentos, que devem ser seguidos após uma leitura detalhada nos respectivos manuais de instrução.



C.1 Sonda *Theta* ML2

Este instrumento apresenta um cabo tipo coaxial com cinco “pernas” internas, sendo dois fios de alimentação, positivo e negativo, dois fios de leitura, positivo e negativo, e um fio blindado (terra). Os dois primeiros fios positivo e negativo, são conectados na fonte de alimentação de 12.0 V 1 A . Os outros dois fios positivo e negativo, são conectados no grupo terminal do corpo do *data logger*. O fio terra não é necessário conectar no grupo terminal do *data logger*, devendo ser isolado.

Esquema de conexão sonda *Theta* ML2 fonte de alimentação – *data logger*

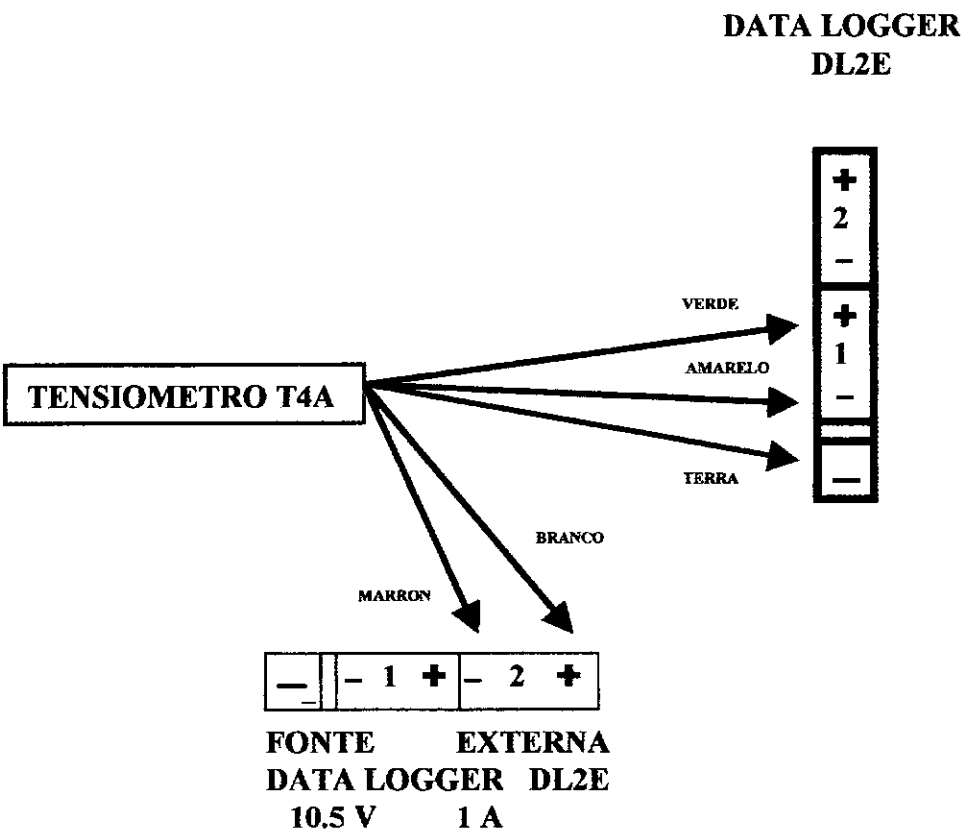


C.2 Tensiômetro - T4A

Este instrumento apresenta um cabo tipo coaxil com “pernas “ internas, sendo dois fios de alimentação, positivo e negativo, dois fios de leitura, positivo e negativo, e um fio blindado (terra). Dois fios, positivo e negativo, são conectados na fonte de alimentação de 10.5 V 1 A . Os outros dois fios, positivo e negativo, são conectados no grupo terminal do corpo do *data logger*. O fio terra não é necessário conectar no grupo terminal do *data logger*, devendo ser isolado.

Deve-se prestar bastante atenção com relação a coloração dos fios, havendo diferença entre o cabo do T4A com relação aos demais instrumentos, principalmente os fios de alimentação, conforme descrito nos esquemas.

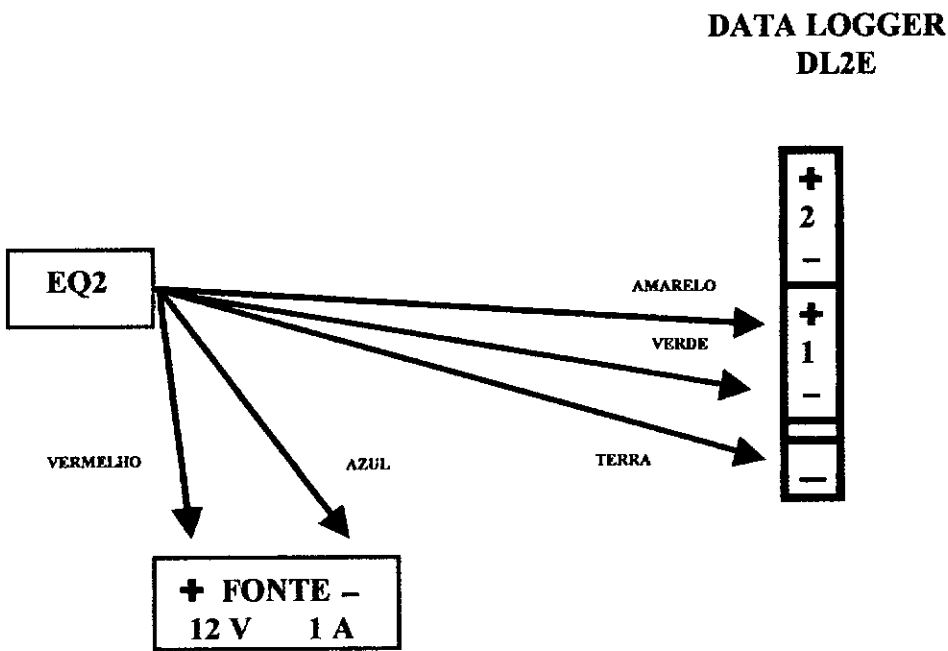
Esquema de conexão Tensiômetro T4A Fonte Alimentação – *data logger*



C.3 Equitensiômetro - EQ2

Este instrumento apresenta um cabo tipo coaxial com cinco “pernas” internas, sendo dois fios de alimentação, positivo e negativo, dois fios de leitura, positivo e negativo, e um fio blindado (terra) . Dois fios, positivo e negativo, são conectados na fonte de alimentação de 12.0 V 1 A . Os outros dois fios, positivo e negativo, são conectados no grupo terminal do corpo do *data logger*. O fio terra não é necessário conectar no grupo terminal do *data logger*, devendo ser isolado.

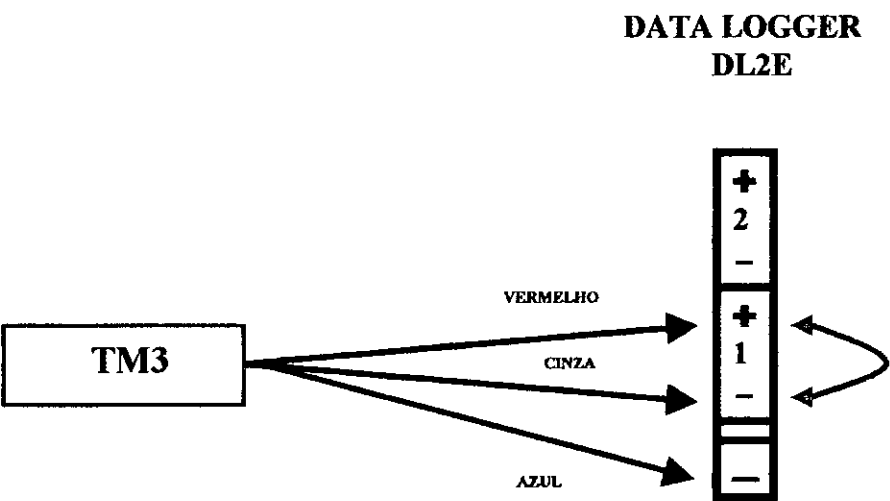
Esquema conexão Tensiômetro de Equivalência EQ2 Fonte de Alimentação – *data logger*.



C.4 Geotermômetro - TM3

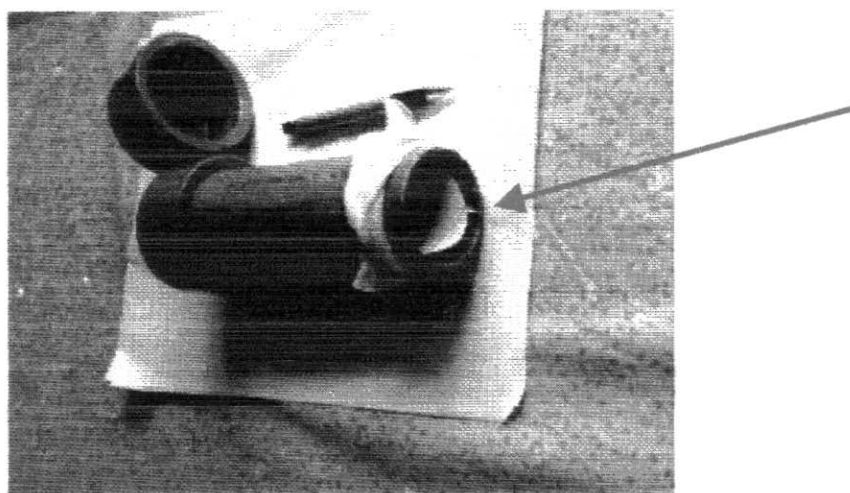
Este sensor apresenta um cabo “comum” com três “pernas” internas, um positivo e dois negativos. Com auxílio do multímetro mede-se separadamente a corrente entre o fio positivo e os fios negativos. A combinação positivo e negativo que der 0 (zero) ohm deverá ser ligada no grupo terminal de leitura do corpo do *data logger*. A combinação positivo e negativo que der 10 K (10000 ohms), o fio negativo deverá ser ligado na entrada de massa do grupo terminal de leitura do corpo do *data logger*. Para que haja a passagem de corrente e sucessivas leituras do sensor de temperatura, tendo em vista este que não é alimentado por fonte externa, deve-se fazer uma ponte entre o fios positivo e o cabo negativo, do canal de leitura. Essa ponte pode ser feita através de um fio de um polo, com a mesma bitola usada nos fios do sensor, unindo-o aos demais cabos conforme mostrado no esquema abaixo.

Esquema de Conexão Termômetro de Solo Termistor 10K Fonte de Alimentação – *data logger*



D. Tubo PVC - papel filtro

Abaixo estão listados os materiais e os procedimentos para se realizar o ensaio de determinação de umidade, pelo método de papel filtro, conforme utilizado neste trabalho:



- Cortar e lixar o tubo de PVC ($\geq 1''$);
- Colar um pedaço de acrílico de 3 a 5 cm de comprimento, 3 a 5 mm de altura e 1 a 2 mm de largura, na base do tubo, onde irá ficar o disco de papel filtro, conforme demonstrado na figura;
- Fazer um buraco de 10 a 15 cm de profundidade (conforme a profundidade desejada nos ensaios) e de acordo com o diâmetro do tubo;
- Inserir o disco de papel filtro no tubo, fechando com um “cap”, vedado com vaselina sólida;
- Anotar data e hora;
- Após o período pré-determinado, retirar o disco de papel filtro, com auxílio de uma pinça, colocando-o imediatamente dentro de um saco plástico, fechando-o em seguida;
- Se o local de coleta de material for longe do laboratório, este saco deverá ser colocado dentro de um isopor;
- Pesar a amostra de papel de filtro em balança graduada em 4 casas decimais após a vírgula;
- Após a pesagem, levar a amostra de papel filtro para uma estufa a $\pm 105^{\circ}\text{C}$ por um período de 24 hs;

- Pesar novamente a amostra de papel filtro em balança graduada em 4 casas decimais após a vírgula ;
- Entrar com esses valores, úmido e seco na Equação de Gutierrez e Chandler, apresentada no capítulo 4, determinando o Potencial Matricial.

E. Tabelas**Tabela I Resultados da Curva de Retenção de Umidade (em % volumétrica)**

	AMOSTRAS	% SATURAÇÃO	0.006 MPa	0.010 MPa	0.033 MPa	0.1 MPa	0.5 MPa	1.5 MPa
CAMPO	P. 01	42.4	22.0	19.8	18.0	11.6	11.6	11.6
	G. 25	31.2	17.6	16.6	15.7	12.0	10.8	10.2
	Média	36.8	19.8	18.2	16.8	11.8	11.2	10.9
MINI- LISÍMETRO A	P. 13	43.2	23.0	20.8	18.8	10.4	10.4	10.2
	P. 21	42.6	24.0	22.0	20.2	12.4	11.2	10.8
	G. 01	33.4	24.6	23.1	21.8	15.8	12.8	11.6
	Média	39.7	23.8	21.9	20.2	12.8	11.4	10.8
MINI- LISÍMETRO B	P. 05	42.0	22.0	19.6	17.0	9.4	9.4	9.4
	P. 33	42.0	25.8	23.2	21.2	13.2	12.0	11.4
	G. 08	33.7	25.5	24.7	24.0	19.6	17.3	16.0
	Média	39.2	24.4	22.5	20.7	14.0	12.9	12.2
MINI- LISÍMETRO C	P. 14	44.0	25.4	23.4	21.4	12.4	11.6	11.2
	P. 19	43.4	23.8	23.6	19.4	10.6	10.6	10.4
	G. 03	34.8	23.8	22.3	21.3	15.9	13.5	12.3
	Média	40.7	24.3	23.1	20.7	12.9	11.9	11.3

Tabela II Características dos Instrumentos Utilizados no Trabalho

Instrumentos	Mensuração	Características Básicas	Tempo de Equilíbrio	Limites de Mensuração	Referências
Tensiômetro T4A	sucção matricial	contato direto	segundos	100 a -80 kPa	UP-GmbH (2000)
Tetha Probe ML2	umidade volumétrica	contato direto	segundos	0 a 1m3.m3	Delta-T devices (2000)
Equitensiômetro EQ2	sucção matricial	contato direto	minutos	0 a -1000kPa	Delta-T devices (2000)
Geotermômetro TM3	temperatura °C	contato direto	minutos	20 a +60	UP-GmbH (2000)