

DESENVOLVIMENTO DE TENSIÔMETROS PARA SUÇÃO ELEVADA,
ENSAIADOS EM LISÍMETROS DE LABORATÓRIO.

Abdoul Aziz Diene

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. Márcio de Souza Soares de Almeida, Ph. D.

Prof. Marcelo Martins Werneck, Ph.D.

Prof. Tácio Mauro Pereira De Campos, Ph.D.

Prof. Pedro Murrieta Santos Neto, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL.

ABRIL DE 2004

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

DIENE, ABDOUL AZIZ.

Desenvolvimento de tensiômetros para sucção elevada ensaiados em lisímetros de laboratório. [Rio de Janeiro] 2004

XII, 173 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, (2004)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

1. Tensiômetros
2. Instrumentação do solo
3. Lisímetros

I. COPPE / UFRJ II. Título (série)

Dedicatória

Para meu pai Medoune Diene & para minha mãe Ndeye Touty Gueye, longa vida com saúde e paz.

Para Minha esposa Patrícia Romana Silva Do Nascimento Diene, pela paciência e apoio, vida longa com saúde e paz.

Para minha Filha Touty Mariam Aminata Do Nascimento Diene pela alegria de puder cuidar de você, vida longa com saúde e paz.

Para Minha avó Nafi Biteye, vida longa com saúde e paz.

Para meus irmãos Mbaye, Amadou, Younouss & Omar, companheiros de Jihad pela vida melhor, longa vida com saúde e paz.

Para minhas irmãs Marietou, Aminata, Anna e Binetou, companheiras de Jihad pela vida melhor, longa vida com saúde e paz.

Para os sobrinhos e sobrinhas Papa NGuirane, Mame Khady, Amadou , Fatou Nafy, Ahmed, Medoune, Mamadou, Moussa, crescem com saúde e paz.

Para todos os outros irmãos e irmãs da família Diene, sobrinhos e sobrinhas vida longa com saúde e paz.

Para minha Tia Esmèria Silva (Melinha) e para meu Tio Evaristo Do Nascimento pelo apoio constante vida longa com saúde e paz.

Para Dannielle, Diego, Dandara, Marco, Luzia Ana, tio Popó e família , Carlos e Dedé pela torcida “organizada”, vida longa com saúde e paz.

Para minhas Tias Aminata Ba e Awa Diene pelos cuidados à família, vida longa com saúde e paz.

Para Meu Tio Abdoul Aziz Gueye, Meus Primos e Primas, vida longa com saúde e paz.

Para meu Amigo e Irmão Sidney Candido Cavalcante e sua companhia Elenir, valeu pela força, vida longa e paz.

Para os amigos e companheiros de luta Sidney Dione, Alain Kaly, Mohamed Diop, Oumou Seck, Elhadji Gaye Diallo, Marie therese, Aminata Touré, Amadou Niang, Amadou Diop, Armel , Dollar, Sougou, Coly etc, a luta continua, vida longa com saúde e paz.

Para meu amigo especial Erivaldo Monteiro Nunes, irmão para sempre, vida longa com saúde e paz.

Para Sociedade Beneficência Muçulmana do Rio de Janeiro e Abdoul Bagui vida longa com saúde e paz.

Para todos que por esquecimento, foram omitidos desta dedicatória.

Agradecimentos

A DEUS pela saúde, paz e disposição.

A todos vocês:

Especialmente ao Prf. Cláudio Mahler & Carlos André Mendes Meus grandes amigos;

Mário Riccio, José Calle, Marcela Texeira, Juliana Rosa, Júlio, Adriana Schueler, Ana Carla Mesquita, Mauro, Eduardo, André Salviano Glória, Ricardo Gil, Luiz Mario, Beth, Rita, Jairo, Serginho, Luiz Almeida, Prf. Marcelo Werneck, Prf. Emílio LaRoviere, Geotecnia, COPPE, LIMA, Fundação Volkswagen da Alemanha.

Sou eternamente grato

Pela confiança,

Pelo incentivo nos momentos mais difíceis,

Pelo apoio constante durante a realização deste trabalho.

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

DESENVOLVIMENTO DE TENSÍOMETROS PARA SUÇÃO ELEVADA, ENSAIADOS EM LISÍMETROS DE LABORATÓRIO COM ESTUDO DA DRENAGEM.

Abdoul Aziz Diene

Abril / 2004

Orientador: Cláudio Fernando Mahler

Programa: Engenharia Civil.

O presente trabalho compreendeu o estudo e desenvolvimento de novos tensiômetros, os quais permitem medição de valores elevados de sucção. Observou-se no presente trabalho que tais tensiômetros apresentam comportamentos diferentes quando da variação dos seus componentes. Assim os efeitos do tipo de transdutor de pressão, tamanho de reservatório de água, dimensões e permeabilidade da pedra porosa foram analisados através do monitoramento dos mesmos, quando instalados em lisímetros, conjuntamente com outros instrumentos automatizados como tensiômetros, equitensiômetros, papel-filtro, higrômetros, termômetros, geotermômetros e TDR.

Ainda dentro deste trabalho foram preparados dois lisímetros de grande porte para laboratório, nos quais além de instalar os equipamentos acima citados, foi estudado o efeito de um dreno na permeabilidade do sistema. Observou-se que quando da presença de uma aeração da matriz do solo, o comportamento do avanço da frente de umidade muda e conseqüentemente a distribuição das tensões de sucção e a velocidade do fluxo.

Os lisímetros foram preenchidos com solo da região de Seropédica e Bom-Jardim, os quais têm características areno-argilosas e silto-argilosas, respectivamente.

Os tensiômetros desenvolvidos neste trabalho mostraram-se eficientes, rápidos e fáceis de serem produzidos em série, sendo os resultados confirmados através da comparação com outros instrumentos instalados nos lisímetros.

O dreno instalado de uma forma peculiar confirmou a importância da aeração na aceleração do fluxo em meios não saturados.

Por fim, os lisímetros construídos apresentaram-se como uma boa alternativa de pesquisa em laboratório, para estudos de movimento da água no solo e desenvolvimento de equipamentos.

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

DEVELOPMENT FOR HIGH SUCTION TENSIO METERS ANALYSED IN LABORATORY LYSIMETERS IN THE STUDY OF DRAINAGE.

Abdoul Aziz Diene

April / 2004

Advisor: Cláudio Fernando Mahler

Department: Civil Engineering

The present work comprehends the study and development of new tensiometers which measure high-suction values. It has been observed in this work that such tensiometers show different kinds of behaviour when there is a variation in their components. The effects of type of transducer, size of water reservoir, dimensions and porous stone permeability have been analyzed by monitoring them when installed in lysimeters together with other devices such as tensiometers, equitensiometers, filter-paper, hydrometers, thermometers, geotermometers and TDR.

Still in this work heavy-duty laboratory lysimeters have been prepared in order to test the devices and the water movement in the soil. The effect of a drain in the permeability of the system has also been studied.

The presence of aeration in the soil provoked by a drain installed in one of the boxes (lysimeters) influences the drainage by accelerating the process of suction variation and increasing the water movement.

Soils of Seropedica (UFRRJ*) and Bom Jardim (Friburgo area) have been used to fill the lysimeters, which contain sandy clay and silt clay, respectively.

The tensiometers developed in this work proved to be efficient, fast and easily manufactured. These results have been confirmed by comparing them with other devices installed in the same lysimeters.

Finally, the lysimeters proved to be a good laboratory alternative for research on studies of water movements in the soil and equipment development.

ÍNDICE

CAPITULO 1: - INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 Objetivo	2
1.2 Etapas da pesquisa	2
1.3 Metodologia de pesquisa	3
CAPITULO 2: - SOLOS NÃO-SATURADOS	4
2.1 Definição e características	4
2.2 Energia da água no solo	7
2.2.1 Potencial gravitacional	8
2.2.2 Potencial matricial	8
2.2.3 Potencial pneumático	9
2.2.4 Potencial osmótico	9
2.2.5 Potencial total	9
2.3 Curva característica de retenção	10
2.4 Proposição para modelagem de curva característica	13
2.5 Capacidade de campo	14
CAPITULO 3: - SUCÇÃO	16
3.1 Sucção osmótica	17
3.2 Sucção matricial	18
3.3 Sucção total	24
3.4 Medição de sucção	25
3.4.1 Psicrômetro	25
❖ Efeito <i>Seebeck</i>	26
❖ Efeito <i>Peltier</i>	26
3.4.1.1 Termissores	27
3.4.1.2 Termopar	27
3.4.1.3 Transistores	27
3.4.2 Sensores de condutividade elétricos	27

3.4.3	Papel filtro	28
3.4.4	Tensiômetros	30
3.4.5	Tensiômetros de sucção elevada	37
3.4.6	Tensiômetros osmóticos	44
CAPITULO 4: - DETERMINAÇÃO DE TEOR DE UMIDADE		45
4.1	Amostragem direta	45
4.2	Sonda de nêutrons	45
4.3	Sonda capacitiva	47
4.4	Refletometria no domínio do tempo TDR	48
4.4.1	Princípio	48
4.4.2	Tipos de sonda	48
4.4.3	Campos de aplicação do TDR	49
4.4.4	Fatores influentes no seu desempenho	49
4.4.5	Problemas de determinação de perfil	55
CAPITULO 5 : - LISÍMETROS		56
6.1	Histórico	56
6.2	Concepção geral-balanço hídrico	56
6.3	Características dos lisímetros	58
6.3.1	Lisímetros com controle de peso	58
6.3.1.1.	Lisímetro de peso mecânico	58
6.3.1.2.	Lisímetro de peso eletrônico	59
6.3.1.3.	Lisímetro hidráulico	59
6.3.1.4.	Lisímetro flutuante	60
6.3.2	Lisímetros volumétricos	61
6.3.2.1.	Lisímetros de compensação com nível freático na superfície	61
6.3.2.2.	Lisímetro de compensação nível freático	61
6.3.2.3.	Tipos especiais de lisímetro de drenagem	61
6.3.2.4.	Lisímetro de percolação	62
6.3.2.5.	Lisímetro de drenagem sem nível freático	62

CAPITULO 6: - ESTUDOS DE LABORATÓRIO	66
6.1 Os novos tensiômetros de sucção elevada.	66
6.1.1 Os componentes	67
7.1.1.1. O transdutor de pressão	67
7.1.1.2. O elemento poroso	67
7.1.1.3. O corpo acrílico	69
7.1.2 Os diferentes modelos de tensiômetros	69
7.1.2.1. O tensiômetro TENSE-ASH 1	70
7.1.2.2. O tensiômetro TENSE-ASH 2	71
7.1.2.3. O tensiômetro TENSE-EPX 1	71
7.1.2.4. O tensiômetro TENSE-EPXO 1	72
• Processo de saturação das pedras porosas	75
• Processo de calibração dos tensiômetros	77
7.2 A instrumentação.	83
7.2.1 O tensiômetro T4	84
7.2.2 A sonda TDR Delta-T	86
7.2.3 Tensiômetro de equivalência EQ2	87
7.2.4 Geotermômetro	89
7.2.5 Papel filtro	90
❖ Determinação de umidade gravimétrica	93
❖ Sistema de aquisição de dados automatizados	95
7.3 Concepção dos lisímetros e caracterização dos solos ensaiados	98
7.3.1 Concepção dos lisímetros	98
❖ Processo de saturação dos solos	100
7.3.2 Caracterização dos solos ensaiados	101
7.3.2.1 Solo dos tanques A & B	101
7.3.2.2 Solo do tanque C	106

CAPITULO 7: - ANALISE E INTERPRETAÇÕES DOS RESULTADOS	111
7.1 Desempenho dos TENSES.	111
7.2 Análise da instrumentação e correlações entre equipamentos.	119
7.3 Desempenho dos lisímetros e controle de drenagem	126
CAPITULO 8: - CONCLUSOES & RECOMENDAÇÕES	128
8.1 Conclusões	128
8.2 Recomendações de pesquisas futuras.	129
CAPITULO 9: - REFERENCIAS	130
ANEXOS	150

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO GERAL.

O fenômeno de sucção no solo vem se destacando como elemento de alta relevância nos estudos geotécnicos, na agricultura e nas ciências ambientais.

A análise de tensões nos solos não-saturados envolve a determinação da sucção matricial, sendo um dos elementos mais importantes no comportamento tensão-deformação (FREDLUND, 1979).

A solução dos problemas geotécnicos encontrados nos solos não-saturados como em estabilidade de encostas, colapsibilidade e expansibilidade dos solos, compactação e infiltração, deriva da determinação das pressões de sucção no solo (GUAN & FREDLUND, 1997).

A determinação da sucção se faz através de varias técnicas combinadas, correlacionadas com outros elementos físicos presentes no solo como a umidade. Os tensiômetros são os equipamentos mais usados para medição das sucções.

A dificuldade destes instrumentos em registrar altas sucções motivou o desenvolvimento de uma nova geração de tensiômetros de sucção elevada no início dos anos 1990 como o proposto por RIDLEY (1993) que mensurou sucções de até 1500 kPa. A partir deste, vários outros protótipos de tensiômetros de sucção elevada vêm sendo desenvolvidos ao redor do mundo, buscando um melhor conhecimento dos fatores que influenciam o desenvolvimento deste tipo de equipamento.

O presente trabalho apresenta novos protótipos de tensiômetros de sucção elevada semelhantes ao desenvolvido por PACHECO, A.C. (2001), no Laboratório de Geotecnia COPPE / UFRJ. Os tensiômetros desenvolvidos sofreram uma variação nos seus componentes como transdutor de pressão, pedra porosa, tamanho de reservatório, a fim de se avaliar a contribuição da cada um na mensuração de dados. A facilidade de se montar um tensiômetro deste formato, permite desenvolver e fabricar diversos equipamentos similares, adaptáveis às condições de campo e faixa de valores que se deseja medir.

O sistema adotado para ensaios e teste dos novos tensiômetros compreendeu lisímetros de laboratório preenchidos com solos típicos do Estado do Rio de Janeiro. A drenagem da água do solo dos lisímetro foi monitorada através de diversos equipamentos, sendo seus resultados analisados em conjunto.

O presente trabalho foi dividido em nove capítulos, tratando o segundo dos conceitos básicos de solos não saturados, o terceiro traz uma revisão sobre sucção, o

quarto a questão da determinação do teor de umidade, o quinto, descreve o escoamento de água em solos não saturados. O sexto capítulo faz uma revisão sobre lisímetros e no sétimo os trabalhos de laboratório desenvolvidos neste projeto. A análise e interpretação dos resultados esta desenvolvida no oitavo capítulo, sendo que no nono são apresentadas as principais conclusões e recomendações de novas pesquisas.

1.1 - Objetivo

O objetivo da presente tese é apresentar o desenvolvimento de novos protótipos de tensiômetros para mensuração de sucções elevadas, correlacionados com outros instrumentos de medição de sucção como tensiômetros automatizados, equitensiômetros, papel-filtro, e de umidade como TDR e amostragem direta; e a concepção de lisímetros de laboratório que permite avaliar o aspecto do avanço de frente de umidade, quando da presença ou não de drenagem no solo.

1.2 – Etapas da Pesquisa

O estudo se concentrou no trabalho de pesquisa constituído essencialmente por atividades de laboratório, cujos aspectos importantes são os seguintes:

- 1º - Dimensionamento e fabricação dos lisímetros de laboratório.
- 2º - Aquisição dos transdutores de pressão e concepção dos tensiômetros;
- 3º - Definição e escolha dos solos a serem ensaiados nos lisímetros de laboratório;
- 4º - Coleta dos solos e instalação dos mesmos nos lisímetros;
- 5º - Saturação e calibração dos tensiômetros novos;
- 6º- Determinação dos instrumentos a serem usados para correlação de medições;
- 7º - Instalação dos equipamentos nos tanques e conexões no *data-logger*;
- 8º - Coleta de dados, preparo de gráficos e análises;
- 9º - Análises e interpretações dos dados;
- 10º - Análise final dos resultados, redação e preparo da dissertação.

O número de equipamentos mobilizados nos ensaios fornece uma grande quantidade de dados coletados e conseqüentemente a serem correlacionados o que garante um maior controle da exatidão das medições.

1.3 - Metodologia da Pesquisa

A metodologia da pesquisa compreendeu o desenvolvimento de equipamentos para medidas de sucção baseado em experiências anteriores e informações da literatura.

Para verificar os equipamentos desenvolvidos foram utilizados outros equipamentos previamente testados e calibrados para comparação dos resultados.

Para verificação do conjunto projetou-se um lisímetro considerando-se no projeto o equipamento com maiores dimensões a ser ali instalado, o equitensiômetro, considerando-se o tipo de solo a ser colocado nos lisímetros, as dimensões dos instrumentos e as distâncias entre eles e as bordas dos lisímetros.

Para acelerar o processo de molhagem e secagem em um dos lisímetros foi instalado um dreno, estudando-se também seus efeitos no decréscimo de umidade e sucção.

CAPITULO 2: - SOLOS NÃO SATURADOS

2.1 - Definições e Características

O solo é definido como um sistema complexo constituído de materiais sólidos, líquidos e gasosos.

O solo é dito não-saturado quando apresentar as três fases de estados físicos: a sólida, a líquida e a gasosa. Para o caso de solos não saturados FREDLUND *et Al*, (1978) propuseram a consideração de uma quarta fase denominada película contrátil (*contractil skin*). A Figura 2.1 apresenta um esquema para o solo incluindo esta “nova” fase:

- A fase sólida é consolidada pela sua textura proporcionada pela distribuição de partículas de areia, silte e / ou argila, e pela sua estrutura composta pelo arranjo das diversas partículas e os efeitos de cimentação.
- A fase líquida é constituída por água seja ela pura ou contendo minerais e matérias orgânicas dissolvidas. Ela pode ocupar integralmente (caso dos solos saturados) o espaço vazio da fase sólida ou parcialmente como no caso dos solos não-saturados.
- A fase gasosa composta por Ar com composição variável, dependendo do caso, ocupa o espaço vazio poupado pela fase líquida ou dissolvido na água.
- A película contrátil apresenta-se como desenvolvendo uma importante função quando o ar no solo está interconectado. No entanto, por ter uma espessura muito pequena, a película contrátil é incorporada à fase líquida e eventuais erros decorridos podem ser desprezados.

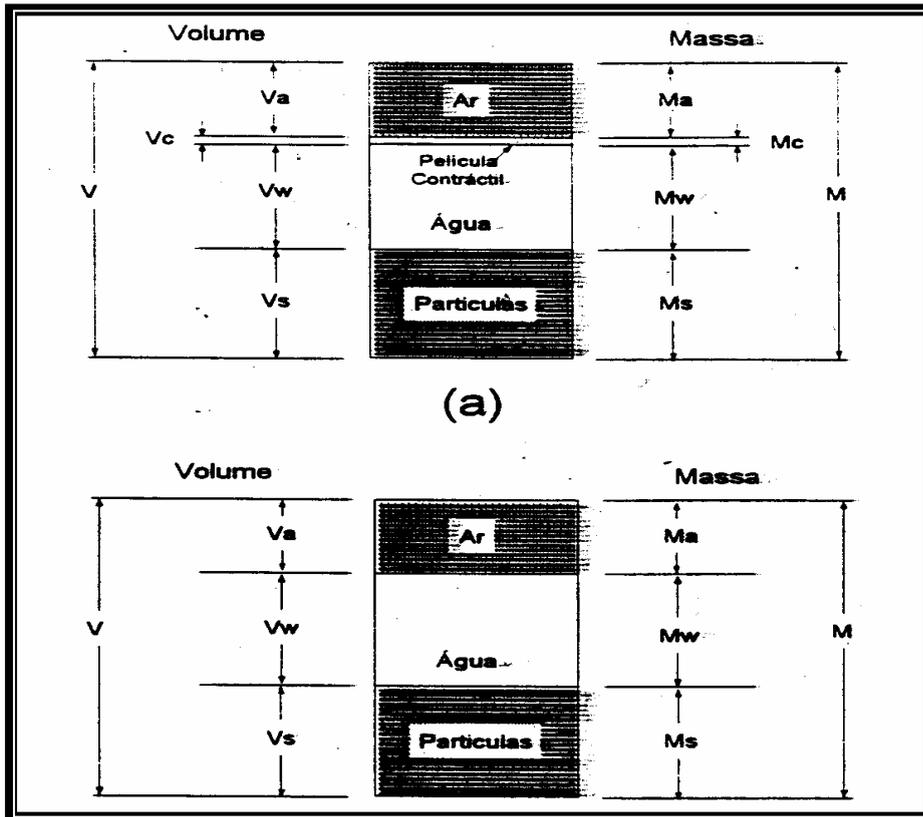


Figura 2.1: - Diagrama de fases do solo.

FREDLUND & RAHARDJO (1993) demonstraram que, quando o ar apresenta-se de forma oclusa no fluido, este se torna extremamente compressível. A presença destas três fases definidas cria uma contínua interação entre elas. Esta interação seja em água adsorvida na partícula sólida, seja em ar dissolvido na água, justifica a complexidade de representação numérica do comportamento dos solos não-saturados, já que existe uma dinâmica própria de variação das forças e fluxos intervenientes nos fenômenos que ocorrem (MAHLER & DIAS DE OLIVEIRA, 1998). A ocorrência destes fenômenos fez com que FREDLUND *et Al* (1978) definisse a interação ar – água como sendo a geratriz de uma interface entre as mesmas como sendo uma quarta fase (a película contrátil) associada às sucções matriciais. Esta interface ar-água gera uma e se manifesta em qualquer superfície líquida no meio circundante.

A tensão superficial é a força existente entre as moléculas da superfície dos materiais envolvidos, o que faz com que uma gota de líquido quando colocada sobre uma superfície esparrame-se ou concentre-se. Isto irá depender dos valores de suas forças: coesivas (F_c), força de atração resultante das forças que as moléculas do líquido exercem entre si, e adesivas (F_a) resultante das forças que as moléculas da superfície de

contato exercem sobre as do líquido. Uma gota de água colocada sobre um vidro limpo se estende sobre ele porque a atração da água pelo vidro (F_a) é maior do que a atração das moléculas de água entre si (F_c). No equilíbrio, a superfície da água é perpendicular à força total que se exerce sobre ela. Isto aparece ilustrado na Figura 2.2a que mostra a força adesiva sobre uma molécula situada no ponto P.

A superfície é perpendicular à força total $S=F_c+F_a$ exercida sobre a molécula.

Como a força da coesão do mercúrio é bem maior do que a força de adesão do vidro, uma gota de mercúrio colocada sobre um vidro adquire a forma arredondada como é mostrado na Figura 2.2b.

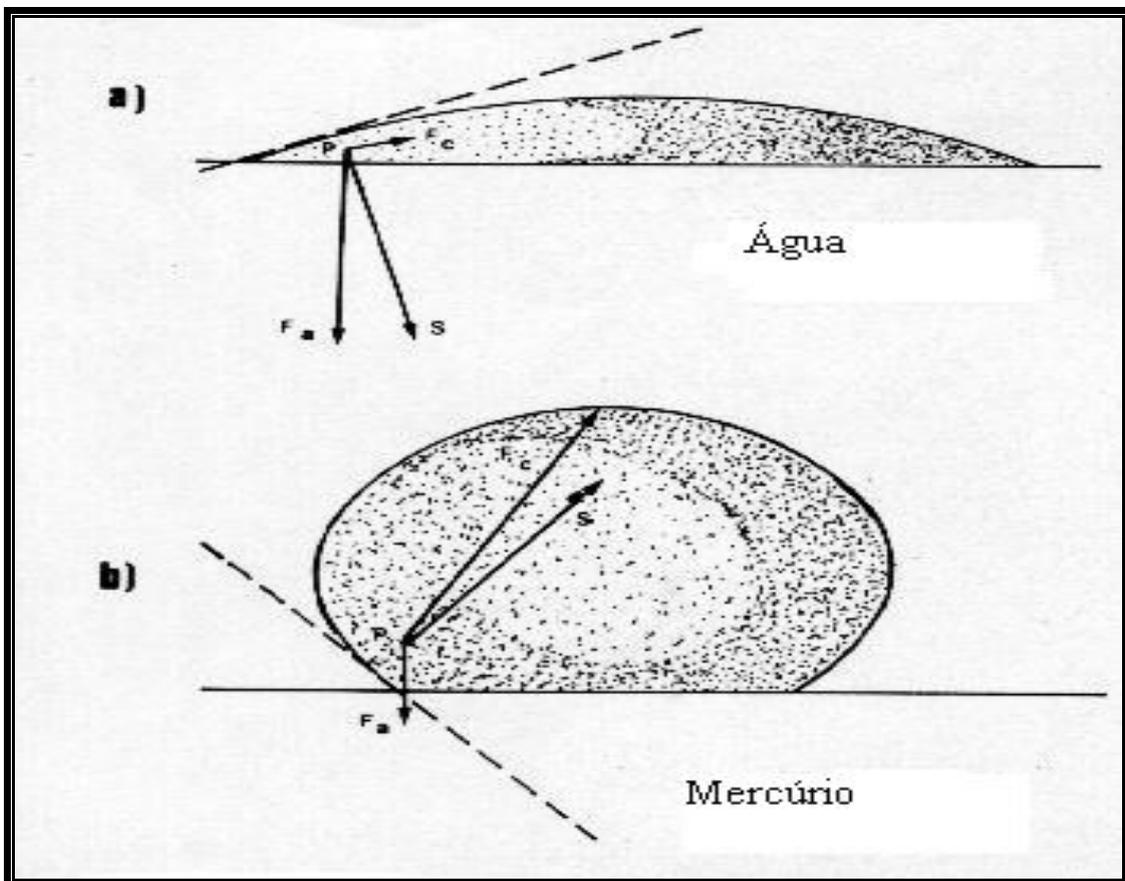


Figura 2.2: - Forças adesivas e coesivas sobre uma molécula localizada na borda de uma gota [a]- água e [b]- mercúrio, colocada sobre uma superfície de vidro (BUENO, W.A. & DEGREVE, L , 1980).

A tensão superficial também varia com a temperatura decrescendo à medida que esta aumenta, como mostra LIBARDI (1995) a Tabela 2.1 apresentando a variação da tensão superficial em relação à temperatura.

Tabela 2.1: – Variação do coeficiente de tensão superficial da água com a temperatura (LIBARDI, 1995).

Temperatura (K)	coeficiente de tensão superficial (mN/m)
265	77
268	76,4
273	75,6
278	74,9
283	74,22
288	73,49
291	73,05
293	72,75
298	71,97
303	71,18
313	69,56
323	67,91
373	58,8

Conseqüentemente a superfície de contacto entre a água e o ar nos menores vazios do solo apresenta-se em curvatura devido à atuação de pressões diferentes nos dois fluidos, criando uma diferença de pressão ou tensão de sucção que é a conseqüência de diferentes fenômenos participativos no comportamento mecânico dos solos não saturados. A importância da tensão de sucção nos solos não-saturados será discutida mais adiante.

Uma melhor compreensão do comportamento da água nas diferentes fases do solo pode ser obtida abordando-se o estado de energia da água dentro do mesmo.

2.2 - Energia da água no solo:

No solo, a velocidade da água é relativamente pequena, donde despreza-se a sua energia cinética que é considerada nula. Conseqüentemente, a sua energia potencial caracteriza o estado da sua energia no solo (BAVER e GARDNER, 1972).

MARSHALL e HOLMES (1981) definiram o potencial total da água do solo como sendo a variação da energia potencial da mesma, em relação ao estado padrão de referencial arbitrado. De fato qualquer trabalho realizado na água, em condições específicas, altera a sua energia potencial em proporção igual ao trabalho realizado.

REICHARDT (1987) admite que quanto menores os poros e quanto mais "ativas" as partículas sólidas do solo, tanto menor a energia potencial matricial da água a eles associada.

O potencial total da água no solo é composto pelo potencial gravitacional, matricial, pneumático, osmótico, térmico e de consolidação, sendo este último desprezível no caso de estudos sobre solos não-saturados.

2.2.1 - Potencial gravitacional: ψ_z

O potencial gravitacional da água depende da posição em que ela se encontra em relação a um plano referencial. Este potencial é nulo no plano referencial, positivo acima dele e negativo abaixo. Este referencial é geralmente o estado padrão para a gravidade e o plano mais adequado é a superfície do solo. Conseqüentemente uma cota abaixo da superfície do solo apresentará um potencial gravitacional negativo. O potencial gravitacional é numericamente igual á profundidade z . No entanto o gradiente do potencial gravitacional é constante e independe da posição considerada no solo e é a força gravitacional que atua na unidade de volume da água do solo. Ele é de grande importância para os solos úmidos próximos á saturação, pois, nestas condições, o gradiente ψ_z é a maior força que atua sobre a água do solo e a medida em que o solo perde água, os outros gradientes vão tomando importância em relação ao gravitacional.

2.2.2 - Potencial matricial: ψ_m

É decorrente da atuação dos efeitos das forças capilares advindo da interação entre as partículas do solo e de adsorção. A componente matricial é sempre negativa. Quando o solo é saturado o $\psi_m = 0$ pois não há interfaces ar - água nos poros do solo, portanto não há forças capilares. Quando este valor é relativamente alto (solo úmido), a capilaridade é o fenômeno mais importante que gera o potencial matricial e nestas condições o arranjo dos grãos, a textura e a composição das partículas ganham uma forte importância. Quando o solo secar (umidade θ baixa), a capilaridade deixa de guiar o potencial matricial pela inexistência dos meniscos nos poros do solo e a componente da água adsorvida ganha importância e passa a guiar o potencial matricial e neste caso o arranjo dos grãos não influencia mais o ψ_m . O potencial matricial é diretamente dependente da umidade θ do solo, pois se o arranjo dos grãos se mantém inalterado a

relação entre o ψ_m e ψ é uma característica física do solo. Esta relação é denominada de curva característica de retenção da água no solo.

2.2.3 - Potencial pneumático: ψ_p

Ele é definido em relação ao estado padrão (superfície do solo) e sofre a ação da pressão atmosférica local e nesta condição é considerado nulo.

2.2.4 - Potencial Osmótico: ψ_o

Ele é decorrente dos íons e outros solutos encontrados na água do solo. Em soluções de alta concentração o potencial osmótico cresce e a umidade da água decresce. A pressão osmótica por si só não é responsável por fluxo de líquido, a menos que exista uma membrana ou uma barreira de difusão que permita a passagem mais fácil da água de que dos sais (HILLEL, 1971). A diferença de potencial osmótico não causa movimento significativo de água no solo (REICHARDT, 1987).

2.2.5 - Potencial total da água: Ψ

O potencial total é a soma de todos os potenciais.

$$\Psi = \psi_z + \psi_m + \psi_p + \psi_o \quad (2.1)$$

Quando o solo é saturado, o potencial gravitacional ganha importância, o potencial pneumático dependerá do valor da carga hidráulica atuante sobre o solo, o potencial matricial será nulo pela ausência de interface ar – água e o potencial osmótico é desprezado pela presença de membrana permeável. Assim o potencial total se reduz a:

$$\Psi = \psi_z + \psi_p \quad (2.2)$$

Em solos não-saturados, o potencial gravimétrico adquire importância a uma umidade elevada e vai decrescendo a medida em que decresce a umidade cuja diminuição aumenta a importância do potencial matricial que inicialmente era pequena. O potencial total se reduz a:

$$\Psi = \psi_z + \psi_m \quad (2.3)$$

Quando o solo secar completamente, tem-se $\theta = \theta_m$ pois $\theta_p = \text{nulo}$ devida à ausência de água livre no sistema e θ_o é desprezado pelo fato da ausência de membrana semi-permeável.

2.3 - Curva Característica de retenção de água

Num solo saturado, em estado de equilíbrio, a poro pressão é superior ou igual à pressão atmosférica. A aplicação de uma sucção provoca a drenagem da água nos vazios do solo e gera uma pressão negativa nos mesmos. A aplicação de altos níveis de sucção afeta a água livre nos vazios e pode afetar a espessura das envoltórias de hidratação, provocando a perda de umidade do solo.

A relação entre a água dos poros e a sucção gerada no solo se define como curva característica. A quantidade de água é determinada em termo de teor de umidade volumétrico (θ), caracterizado como a relação entre o volume de água e o volume total, teor de umidade gravimétrica (w), cuja magnitude é determinada em função da relação entre pesos de água e de sólidos. A diferença ($u_w - u_a$) entre as pressões na água e no ar presentes nos interstícios do solo estabelece a sucção matricial (u); e quando da incorporação da parcela de sucção osmótica, determina-se, neste caso a sucção total. FREDLUND e XING (1994) consideram uma equivalência entre a sucção total e matricial quando atingirem altos valores de ordem superior a 1500 kPa.

A forma mais difusa de representação de curva característica é aquela que relaciona teor de umidade volumétrico e a sucção, entre outros. No entanto o formato da curva é influenciado pelo índice de vazios (e), e conseqüentemente, pela distribuição das frações granulométricas. Desta forma, a perda de umidade brusca nos solos arenosos, na presença de uma determinada sucção determina uma tendência para estes enquanto que solos argilosos tendem a apresentar curvas suaves. Similarmente estes fenômenos acontecem na presença de curvas características de solos uniformes e solos bem graduados.

Na prática, a aplicação de uma pequena sucção não gerará um fluxo de água até que esta atinja um determinado valor crítico capaz de deslocar a água nos vazios maiores. Esta sucção é definida como sucção de entrada de ar (u_b). O crescimento gradual da sucção gera o esvaziamento dos vazios menores até que esta atinja altos valores. Neste instante, somente vazios menores ainda, retêm a água. Conseguem-se

determinar o valor de sucção crítica, em solo bem graduado, embora pequeno. Geralmente, segundo AUBERTINE *et Al* (1998), estima-se que ψ_b varie de 0,2 a 1kPa (seja 2 a 10 cm de coluna de água) em areias graúdas, de 1 a 3,5 kPa em areias médias, de 3,5 a 7,5 Kpa em areias finas, de 7 a 25 kPa em siltes e mais do que 25 kPa em argilas.

Na literatura, encontram-se métodos propostos para a determinação de sucção crítica (ψ_b). A Figura 3 mostra a sugestão de BROOKS e COREY (1964) baseada num procedimento gráfico a partir da inserção entre dois trechos lineares. A observação de AUBERTIN *et Al.*(1998) sugere que, geralmente, (ψ_b) esteja relacionado a um valor de umidade correspondente a 90% da umidade de saturação (ψ_s). O fundamento desta proposta é o fato de, ao atingir (ψ_b), o ar dos interstícios forma canais contínuos. Na prática, adota-se esta hipótese gerando-se um valor de (ψ_b) aproximadamente 25% superior que o obtido graficamente.

A umidade residual (ψ_r) é definida como o limite inferior a partir do qual qualquer acréscimo na sucção matricial pouco afeta os valores da umidade. A sua determinação experimental é feita segundo a Figura 2.3, a partir da interseção das tangentes à curva característica. Na prática o teor de umidade residual é associado a um valor de sucção elevado. Assim é possível usar o teor de umidade de uma amostra seca para estimar ψ_r . È possível associar o teor de umidade residual a um valor de sucção de $\psi_r = -1500$ kPa de acordo com VAN GENUCHTEN (1980). FREDLUND e XING (1994) determinaram experimentalmente a sucção correspondente à condição de teor de umidade nulo, em vários solos, e observaram um valor da ordem de 10^6 kPa.

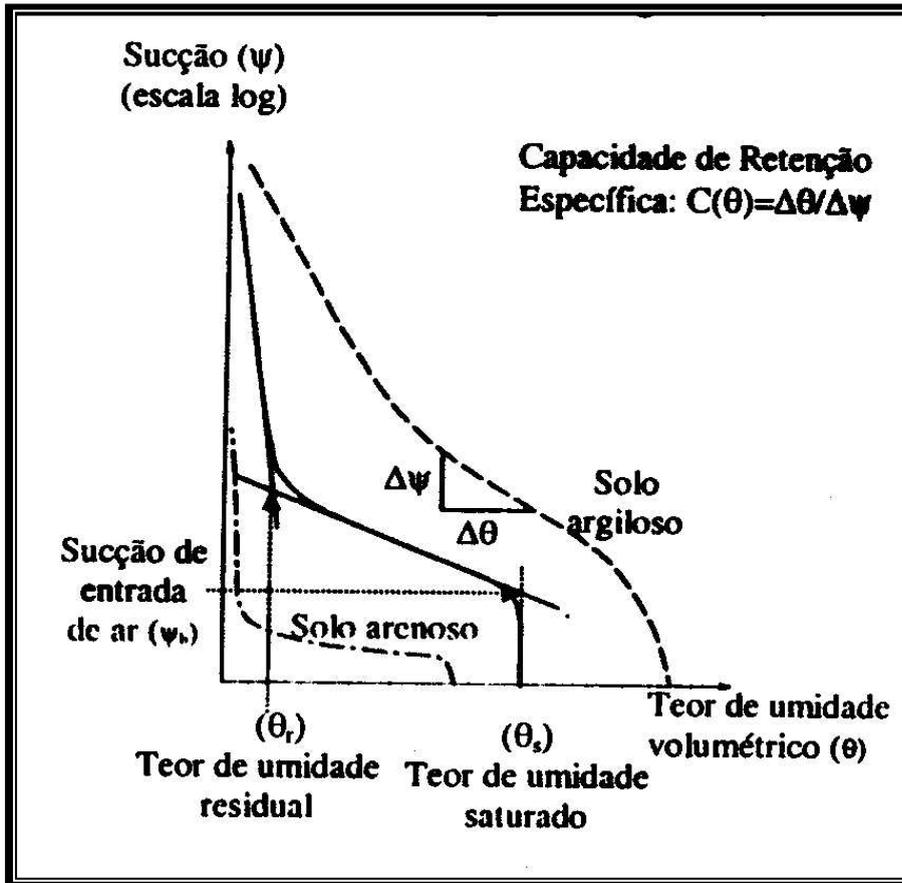


Figura 2.3: - Curvas características típicas.

O teor de umidade volumétrica correspondente à condição de saturação (θ_s) corresponde à porosidade (n), observando que ($\theta_s = n \times S$).

A capacidade de retenção específica é o parâmetro que define a variação de umidade (θ) em função da variação de sucção (ψ). A partir da tangente à curva característica, determina-se este parâmetro que também varia com o nível de sucção.

A granulometria, a composição química, e outros fatores afetam a forma da curva característica. A mudança de arranjo estrutural por compactação altera o volume dos vazios maiores, transformando-os em poros de dimensões intermediárias em crescimento percentual, mas os micro-poros permanecem inalterados. Desta forma a função de distribuição de volume de vazios é modificada afetando principalmente o trecho da curva correspondente a baixos valores de sucção (GERSCOVICH, 1994).

A história de variação de umidade deve ser considerada. O solo em processo de secagem-drenagem apresenta na sua curva característica, para uma determinada umidade, valores de sucções maiores que quando em processo umedecimento. O maior

teor de umidade alcançado num processo de umedecimento dificilmente atingirá o teor de umidade saturado. Segundo HILLEL (1971), esta histerese deve-se à presença de ar ou mesmo mudanças estruturais decorrentes do processo de fluxo, que podem provocar fenômenos de inchamento, falta de uniformidade geométrica dos vazios, ressecamento ou envelhecimento do solo.

Dois fatores explicam a permanência de ar nos vazios do solo: (i) diferentes velocidades do avanço da frente de saturação; (ii) altos valores de sucção, inibindo em certas regiões o avanço da frente da saturação. SMITH e BROWNING (1942 - In MARINHO, 1994) observaram que em média 9,1% dos vazios permanecem com ar após processo de saturação. WILSON e Al (1980) verificaram que a parcela de ar retido era proporcional à parcela da fração grossa, sendo 20% o máximo valor registrado. Com isto, em um processo de umedecimento, muitas vezes não se atinge a saturação completa; isto é o teor de umidade saturado é numericamente inferior à porosidade ($\theta_s < n$).

Não existe de nenhuma teoria que represente corretamente a relação umidade x sucção. Existem, entretanto, diversas proposições na literatura, as quais são validas para alguns tipos de solos e para determinadas faixas de sucção. A complexidade dos efeitos da adsorção e das diversas geometrias dos vazios torna muito difícil a modelagem de uma curva característica adequada a qualquer tipo de solo.

2.4 – Proposições para modelagem de curva característica

Diversas proposições empíricas foram apresentadas para simular a curva característica. Algumas modelam a função que relaciona sucção com umidade (GARDNER, 1958; BROOKS e COREY, 1964; FARREL e LARSSON, 1972; ROGER e HORNBERGER, 1978; WILLIAM *et Al*, 1983; MCKEE e BUMB, 1987; HAVERKAMP e PARLANGE, 1986; VAN GENUCHTEN, 1980; FREDLUND e XING, 1984; HOPMANS, J.W. *et Al*, 2002). Outros propõem a obtenção da curva característica a partir de frações granulométricas (GHOSH, 1980; RAWLS e BRAKENSIEK, 1989). Esta ultima abordagem é bastante conveniente já que tais informações são rotineiramente determinadas experimentalmente. De uma forma geral os modelos baseiam-se no conceito de similaridade entre a curva característica e a

função de distribuição granulométrica, que indiretamente está relacionada à distribuição acumulativa de volume de vazios.

Os métodos assumem que sob condições e em que a pressão no líquido é negativa, a curva do menisco assume uma forma esférica. Esta hipótese é válida para o caso de tubo cilíndrico.

Os métodos que modelam a curva característica em função das frações granulométricas não consideram a influência do arranjo estrutural. Adicionalmente, ao relacionar diâmetro do vazio com o valor de sucção estes métodos não consideram a não uniformidade geométrica dos vazios, já que assumem que existe uma relação unívoca entre a sucção e diâmetro de vazio.

Em geral, os métodos pressupõem a inexistência de variação de volume de solo durante o processo de umedecimento ou secagem.

Face às dificuldades experimentais para obtenção da curva característica, alguns métodos estão inclusive sendo estendidos para novas aplicações. Equações empíricas relacionando os parâmetros do modelo de VAN GENUCHTEN às condições de compactação, e índice de plasticidade foram propostos por TINJUM *et Al* (1997).

2.5 - Capacidade de campo

O solo é chamado saturado na situação de umidade ($q = q_s$), ao longo do perfil em consideração, e seco na condição de umidade ($q = 0$). Para se quantificar o máximo de água que um solo pode conter, até uma profundidade L , considera-se a seguinte equação:

$$A_L = \int_0^L q_s dz \cong \bar{q}_s L \quad (2.4)$$

onde

A_L – é a quantidade de água máxima armazenada;

q_s – umidade na saturação;

L – profundidade considerada.

O solo, no entanto não retém a água devido à distribuição de potenciais. Esta condição provoca a drenagem pelo efeito potencial gravitacional que é de

9,81 \cong 10kPa/m e a componente matricial é nula. O perfil torna-se não-saturado progressivamente após a drenagem e a umidade diminui continuamente; é a água gravitacional. A velocidade de drenagem depende da condutividade hidráulica do solo, rápida para solo arenoso, e lenta para solo argiloso. Drenando de cima para baixo, a distribuição de umidade no perfil de um solo homogêneo aumenta com a profundidade. Esta distribuição gera um gradiente de potencial matricial contrário ao gradiente gravitacional. Com a variação do tempo, o gradiente matricial cresce até que em dada condição de umidade ele se iguala ao gradiente gravitacional. O perfil não drena mais nesta condição e a água está em equilíbrio. O perfil de solo encontra-se na capacidade de campo (CC), que é a máxima de água que um solo pode reter (REICHARDT, 1987). Para uma umidade do solo na capacidade de campo igual a q_{cc} , então teremos:

$$A_L(CC) = \int_0^L q_{cc} dz \cong \bar{q}_{cc} L \quad (2.5)$$

Para se medir a capacidade de campo de um solo, inunda-se uma área de solo de 4 a 25 m² até uma profundidade 3/2L, sendo L a camada de interesse para a determinação da CC. Concluído a inundação, a área pode ser coberta com uma lona plástica ou resto de matéria orgânica (palha) para prevenir perdas por evapo-transpiração na superfície. Espera-se o equilíbrio ($grad_y_g = grad_y_m$) que, na prática, ocorre depois de 2 a 3 dias para solos arenosos, e de 4 a 7 dias para solos argilosos (REICHARDT, 1987). Remove-se a cobertura e executa-se amostragens de umidade do solo (q_{cc}) na camada 0-L, preferencialmente em três pontos distantes mais de um metro entre si e em várias profundidades. Com tais dados calcula-se $A_L(CC)$.

CAPITULO 3: - SUCCÃO

AITCHISON E RICHARDS (1965 In: RIDLEY and BURLAND, 1993) definiram a sucção como: a diferença entre a pressão de ar e a poro pressão de água do solo; quando a pressão do ar é atmosférica, a poro pressão de água é negativa.

Segundo MARINHO (1995), a sucção é a pressão hidrostática da água intersticial, decorrente de condições físico-químicas, que fazem com que o sistema água-solo absorva ou perca água, dependendo das condições ambientais, aumentando ou reduzindo o grau de saturação. No solo os fatores condicionantes no fenômeno da sucção são a granulometria, a densidade e a umidade (FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

De acordo com AITCHISON e RICHARDS (1965 In: RIDLEY and BURLAND, 1993) a sucção pode ser definida como:

- **Sucção total:**

Definida como sendo a Sucção equivalente obtida através da medição da pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com a água intersticial (no sistema solo-água intersticial), em relação á pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com água pura “livre” (interface ar / água plana).

- **Sucção osmótica:**

É a sucção equivalente obtida através da medição da pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com uma solução de composição idêntica a da água intersticial (mas com interface ar água intersticial plana), em relação à pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com a água pura “livre” (interface ar/ água plana).

- **Sucção matricial:**

É a sucção equivalente obtida através da medição da pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com a água intersticial (no sistema solo/ água intersticial), em relação à pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com uma solução de composição idêntica a da água intersticial (com a interface ar/água intersticial plana).

3.1 - A sucção osmótica:

Osmose é a propriedade pela qual um solvente passa de uma solução pouco concentrada para outra mais concentrada (Figura 3.1), através de uma membrana semipermeável. Esta passagem decorre de uma força, que se reflete na forma de pressão (p) sobre líquido.

Isto ocorre, pois há um desequilíbrio entre as forças de atração das moléculas do soluto e do solvente. As moléculas do solvente são atraídas para o lado que possui mais soluto. A membrana permite a passagem do solvente e não do soluto.

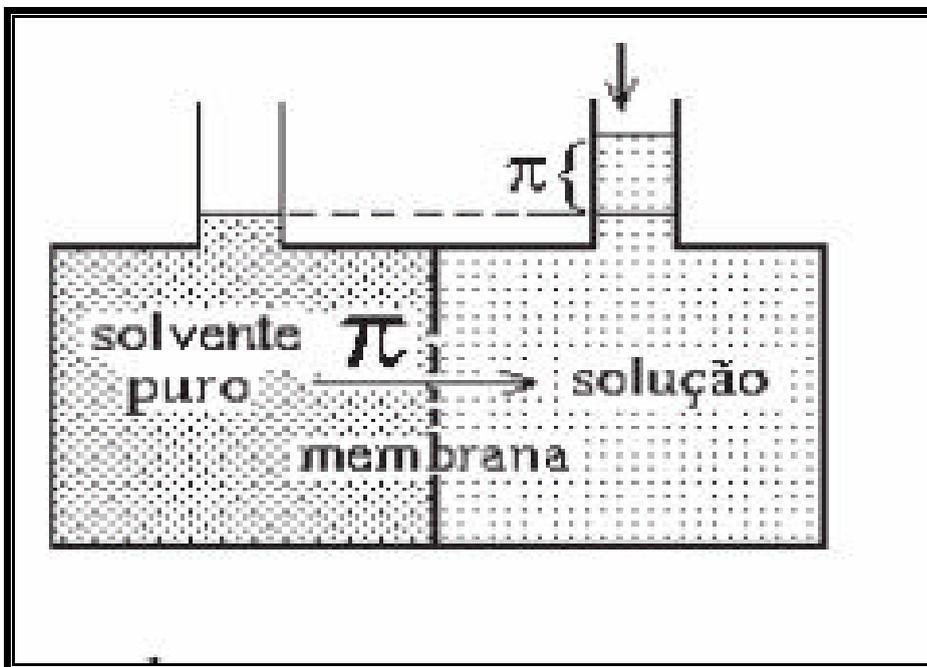


Figura 3.1: - Fenômeno da osmose

No solo, de uma maneira geral, não existem membranas semipermeáveis e a pressão osmótica não é considerada para o movimento da água. Qualquer gradiente de pressão osmótica que se estabeleça no solo por uma razão qualquer acaba provocando um movimento de solutos (que se redistribuem) e um movimento desprezível de água.

O fenômeno da osmose pode ocorrer em solos saturados ou não saturados. Sabe-se que se alterando a concentração e/ou tipo de sal na água do solo, proporciona-se uma alteração no comportamento do mesmo. Alterações na concentração de sais atuam como agentes modificadores das características do solo. Contaminantes líquidos em contacto com o solo podem gerar fluxo devido à osmose. A presença de vegetação pode induzir

fluxo osmótico e eventualmente consolidação, a sucção osmótica neste caso é controlada pela diferença de concentração entre a planta e a água do solo. Se a concentração do soluto na água do solo exceder a das células da seiva, o fluxo poderá ser reduzido (BACHE & MAC ASKILL, 1984). Como as membranas celulares da planta são semipermeáveis, nela a pressão osmótica é de grande importância. Devido a esta membrana, a água penetra na planta. Na passagem da água do solo para as raízes também se encontram membranas semipermeáveis e a pressão osmótica não pode ser desprezada. No entanto, esta sucção gerada é considerada neste caso como sucção matricial (MARINHO, 1995). O uso da osmose para gerar sucção matricial é descrito por (DELAGE *et Al.* 1992).

A pressão osmótica e a sucção osmótica são numericamente iguais, mas com sinais opostos. Pode-se determinar a pressão osmótica aproximada pela equação de Van't Hoff:

$$y_{os} = -RTC \quad \text{e} \quad y_{os} = p \quad (3.1)$$

Onde

R - constante geral dos gases (0.082 Atm x l/mol x °K; 84.7cm H₂O x l/mol x °K; 8.2Mpa x m³/mol x °K).

T - temperatura absoluta da solução (em °K);

C – concentração de soluto em mol/l.

3.2 - Sucção matricial:

A sucção matricial é a pressão (relativa) negativa que se desenvolve na água intersticial devido à capilaridade e às forças de adsorção. A interação das três fases necessárias para geração de sucção matricial é ilustrada na Figura 3.2.

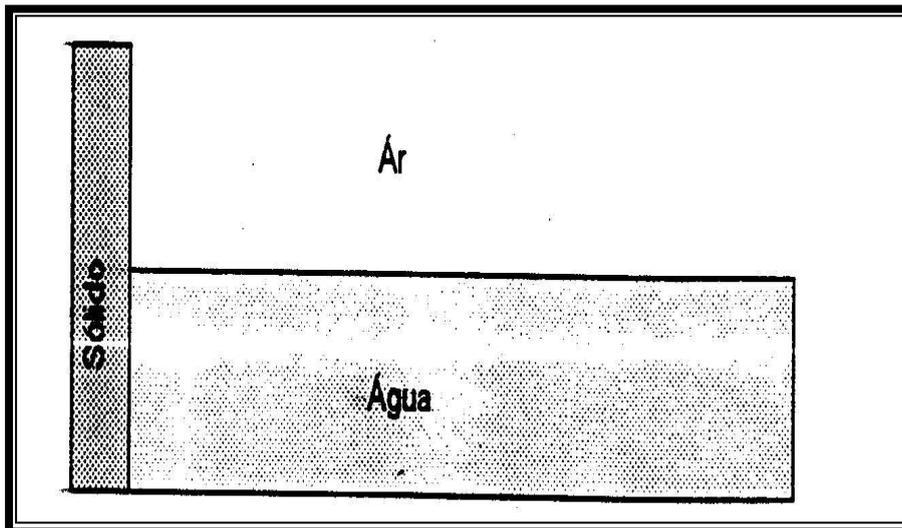


Figura 3.2: - Contato de um líquido com um sólido sem levar em conta a formação de menisco.

A sucção matricial é a diferença de pressão através de uma membrana que separa o sistema solo-água intersticial de uma solução idêntica à da água intersticial, mas sem solo. A membrana é permeável à solução, mas não às partículas de solo ou ar (HILLEL, 1971).

- **A formação de menisco**

Quando um líquido está em contato com ar como na Figura 3.3; na superfície de contato entre o ar a água e a parede sólida, as moléculas de água estão sujeitas às forças de coesão (F_c) e de adesão (F_a), oriundas das atrações moleculares da água e da atração entre as moléculas da água e do sólido em contato, neste caso, o vidro. Quando a resultante das forças atuantes é normal à superfície, o líquido estará em repouso. Para que isso aconteça, a superfície do líquido tem de curvar-se afim de que a resultante fique perpendicular a ela. Forma-se então um ângulo entre a superfície do líquido e a parede sólida que BADILLO & RODRIGUEZ (1981) denominaram de ângulo de contato T , que confere uma forma côncava (quando superior a 90°) ou uma forma convexa (quando inferior a 90°) ao menisco, como ilustrado na Figura 3.3.

Com o advindo do menisco, gera-se o aumento da área de superfície que de plana ficou curva, e esse acréscimo de área é decorrente do advindo de um trabalho que provoca o acréscimo de sua energia potencial de superfície. Conseqüentemente, com a formação do menisco, armazena-se energia potencial na superfície líquida.

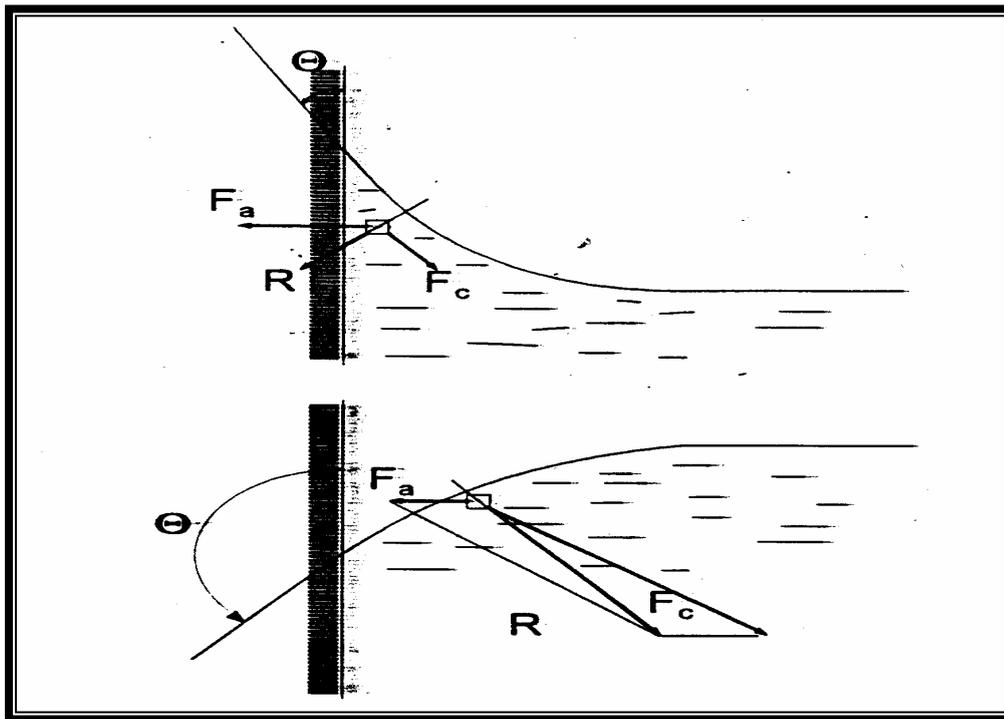


Figura 3.3: Formação dos meniscos (BADILLO & RODRIGUEZ, 1981).

- **Ascensão capilar**

A capilaridade faz a água subir do fundo do solo para as raízes das plantas. Nos terrenos ressecados, no rigor do verão, a água sobe por capilaridade por longos e finos canais no solo endurecido e evapora. LEITE LOPES, J & TIOMNO, J (1961) simularam a ascensão capilar; o mergulhando uma lâmina de vidro numa vasilha com água. O vidro atrai as moléculas de água próximas, puxa-as para cima e faz uma camada de água subir pelos seus lados (Figura. 3.4-1A). A atração do vidro eleva a água. Colocando-se outra lâmina paralela à primeira, ambas as lâminas atrairão a água e a puxarão para cima no espaço entre elas (Figura 3.4-1B). Aproximando-se mais as lâminas, a atração do vidro suportará a mesma quantidade de água que antes. Observa-se que a camada de água na Figura 3.4-1C é mais estreita; portanto ela deve subir mais. Quanto mais estreita a abertura, tanto mais o líquido subirá. Observa-se isso fazendo as lâminas se tocarem numa extremidade de modo a formar uma abertura com pequeno ângulo entre elas. A água subirá mais alto no espaço mais estreito, próximo à aresta vertical, do que no espaço mais largo da abertura (Figura 3.4-1D).

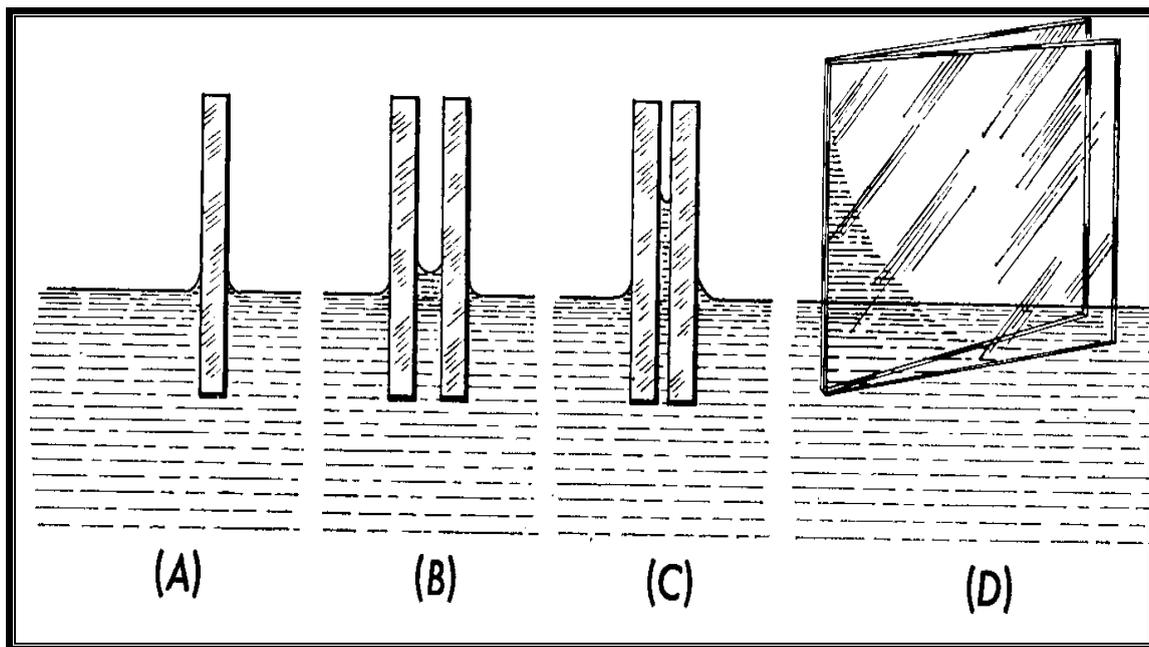


Figura 3.4-1: - Adesão maior que coesão. (A) O vidro atrai a água. (B) Duas lâminas de vidro atraem a água. (C) Menor espaço, maior ascensão de água. (D) Ascensão da água na cunha. Fonte: LEITE LOPES, J & TIOMNO, J (1961)

Contrariamente à água, a atração molecular puxa o mercúrio para baixo. Devido ao fato do mercúrio não se prender ao vidro e não o molhar, a atração das moléculas deste é maior que a atração do vidro sobre elas. As moléculas do mercúrio se atraem mais fortemente do que a adesão ao vidro. Quando se mergulha uma lâmina de vidro no mercúrio, o líquido não vem para perto do vidro, mas é afastado (Fig. 3.4-2A). A lâmina atrai cada molécula de mercúrio próxima; as outras moléculas de mercúrio, porém, as atraem mais fortemente, de modo que o mercúrio é afastado para fora do vidro. Ao mergulharem-se duas lâminas no mercúrio, estas atraem as moléculas entre elas, mas o mercúrio no fundo atrai as moléculas mais fortemente e as puxam para baixo, até um ponto abaixo do nível externo do mercúrio (Fig. 3.4-2B).

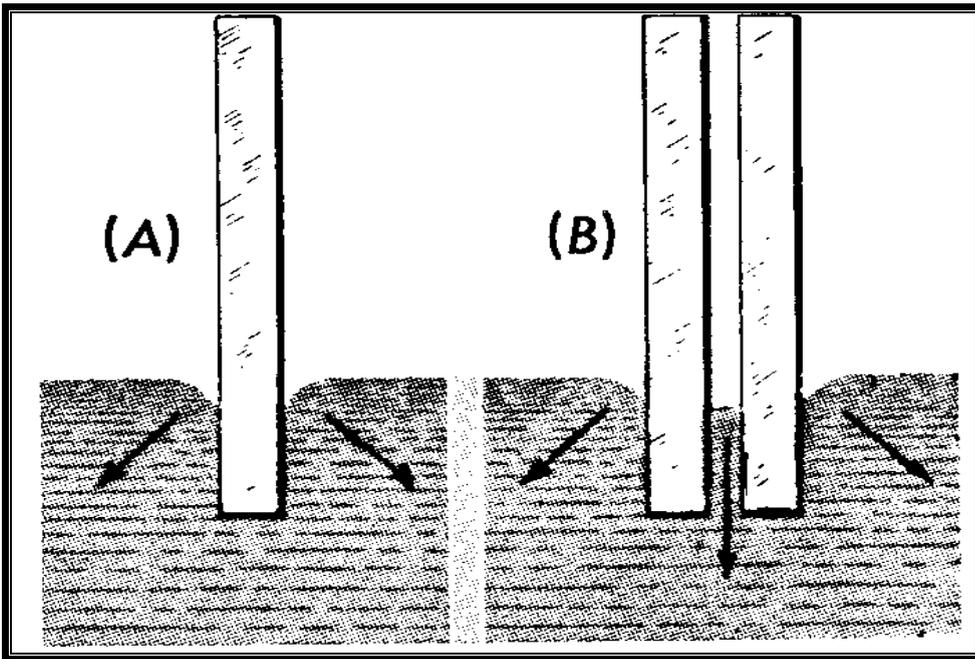


Figura 3.4-2: - Coesão maior que adesão. (A) O mercúrio atrai suas moléculas da superfície afastando-se do vidro, (B) O mercúrio puxa para baixo as moléculas superficiais da região entre as lâminas. Fonte: (LEITE LOPES, J & TIOMNO, J (1961).

Pode se determinar a ascensão capilar baseando-se na Figura 3.5 onde esta aparece em um tubo de vidro limpo, de pequeno diâmetro, em contato com a superfície livre da água.

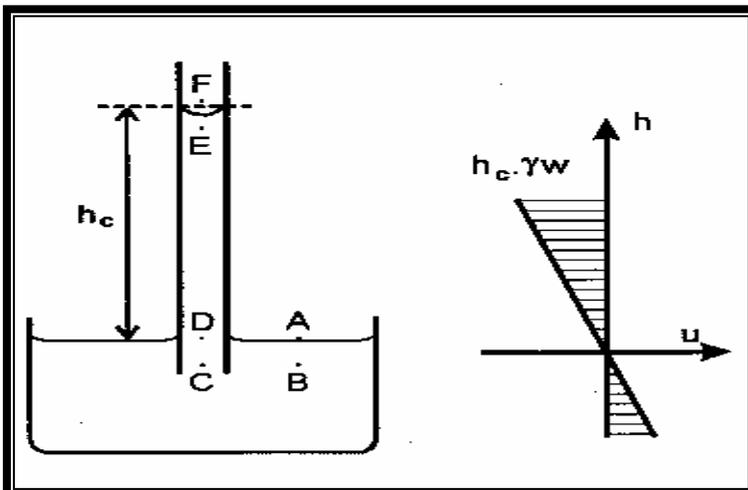


Figura 3.5: - Altura de ascensão e pressão da água num tubo.

A água sobe no tubo de vidro até atingir uma certa altura provocada pela combinação de contactos entre o vidro, a água, o ar e a tensão superficial da água. Observa-se então que a superfície da água no tubo de vidro fica esférica. Assim, a altura da subida capilar é determinada pelo peso da água no tubo, com a resultante da tensão superficial que a mantém nesta posição acima do nível d'água livre; então, o peso de água num tubo de raio r e altura de ascensão capilar h_c pode ser descrito por:

$$P = \rho \cdot r^2 \cdot h_c \cdot g_w \quad (3.2)$$

Levando-se em conta a tensão superficial T atuando em toda a superfície de contato água – tubo, a força resultante será:

$$F = 2 \cdot \rho \cdot r \cdot T \quad (3.3)$$

Igualando (1) e (2) tem-se:

$$h_c = (2 \cdot T) / (\rho \cdot g_w) \quad (3.4)$$

A similaridade entre o tubo capilar e os poros do solo embora estes sejam muitos irregulares e interconectados garante a possibilidade da determinação numérica da ascensão capilar em qualquer solo.

3.3. Sucção Total:

O conceito de sucção está presente é mostrado na Figura abaixo.

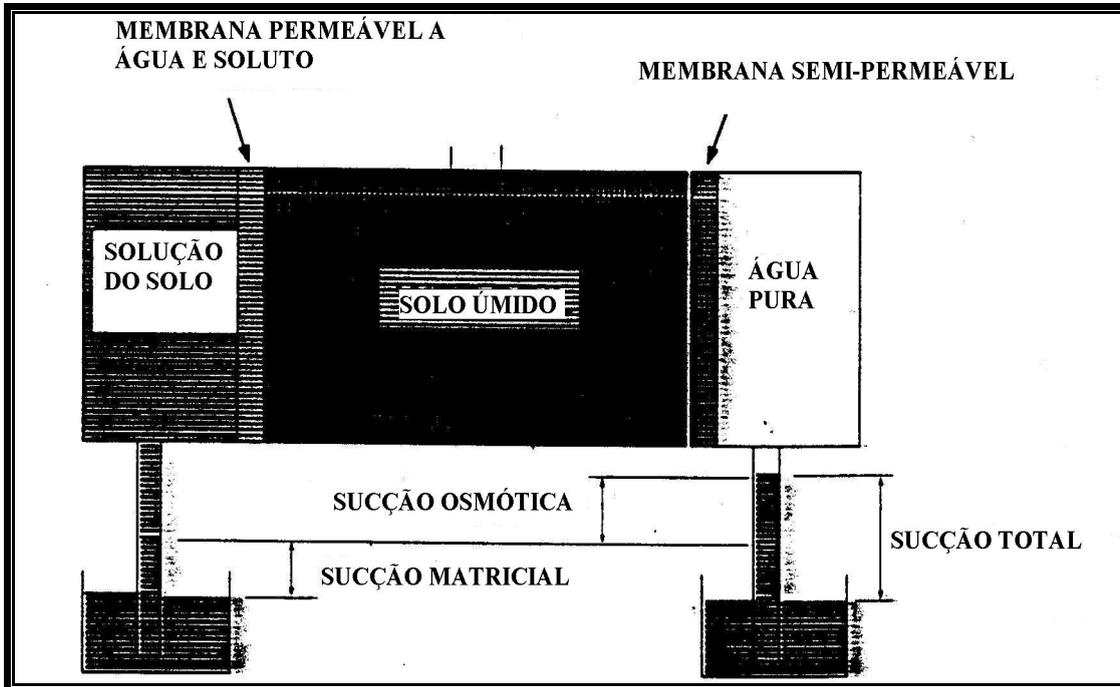


Figura 3.6: - Sistema ilustrando os conceitos de sucção total e matricial (HILLEL, 1971).

A sucção total é a adição da sucção matricial e sucção osmótica, sendo que normalmente esta última é obtida pela diferença entre as sucções totais e matriciais, representadas esquematicamente pela equação:

$$S_t = (u_a - u_w) + s_o \quad (3.5)$$

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

3.4. Medição de sucção:

As técnicas utilizadas para determinar a sucção no solo são variadas e as principais são as seguintes segundo Tabela 3.1.

Tabela 3.1: - Técnicas de medição de sucção (FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

Técnicas	sucção matricial	sucção osmótica	sucção total	Intervalo (kPa)	referências
Psicrômetro		X	X	100 - 8000	Spanner(1951) Dimos(1991)
Papel filtro	X		X	0 - 29000	Chandler <i>et al.</i> (1991)
Tensiômetro	X		X	0 - 29 0 - >>1000	Stannard <i>et al.</i> (1992) Ridley and Burland(1993)
Translação de eixos				0 - 1500	Richards,LA(1941)
Condutividade térmica	X			0 - 400	Fredlund and Rahardjo(1993)
Condutividade elétrica	X	X		20 - 1500	Krahn and Fredlund

3.4.1 - Psicrômetro:

O psicrômetro é um transdutor térmico. Segundo HAYWOOD (1980), a psicrometria é o estudo de misturas de ar e vapor a água em condições bem próxima às da atmosférica.

O psicrômetro é um equipamento composto por um sistema que permite a medição de duas temperaturas: aquela relativa a ponto de orvalho e a temperatura ambiente (MARINHO, 1997).

Desta forma, ele se adapta com eficácia à medição de umidade relativa numa dada calibração. HILL (1930 **In:** MARINHO, 1998) utilizou pela primeira vez o psicrômetro para determinação de umidade relativa. MONTEITH & OWER (1958) aplicaram a metodologia para medição de sucção total. A metodologia para medição de sucção é baseada na curva de calibração do equipamento que relaciona a umidade relativa com a sucção.

O psicrômetro funciona com a combinação de dois efeitos (FREDLUND e RAHARDJO, 1993):

- ***Efeito Seebeck***

Quando uma força eletromotriz é gerada entre dois metais diferentes num circuito fechado cujas junções tenham temperaturas diferentes. Usando um micro-voltímetro, pode se medir a força eletromotriz gerada pelo efeito Seebeck, pelo fato que uma das junções do circuito servirá de referencial com temperatura constante e a outra junção servirá de sensor diferencial de temperatura.

- ***Efeito Peltier***

Na passagem de uma corrente num circuito composto com dois metais diferentes, uma das junções se resfria enquanto a outra se esquentam. Na inversão de direção da passagem da corrente, provoca-se um efeito de reversão térmica nas duas junções.

As medidas podem ser feitas utilizando-se dois termômetros ou apenas um como o Psicrômetro Peltier. Psicrômetro de termo-pares pode ser usado para medir a sucção total de um solo medindo a umidade relativa na fase de ar dos poros de solo ou da região próxima ao solo. De uma forma geral a medição de sucção por psicrômetro fica no intervalo entre 100 kPa e 10 MPa. A umidade relativa está relacionada com a sucção total de acordo com a equação:

$$\Psi = - \left[\left(\frac{RT}{V_{w_0}} \cdot wv \right) \ln(uv/uv_0) \right] \quad (3.6)$$

onde:

ϕ = sucção total do solo em kPa;

R = constante universal do gás (8,31432 J/molK);

T = temperatura absoluta (273,16 + t°) (°K)

V_{w0} = volume específico de água (m³ e /kg);

M_v = massa molecular do vapor de água (18,016 kg/kmol);

u_v = pressão parcial do vapor de pressão dos poros (kPa);

u_{v0} = pressão de saturação do vapor de água sobre uma superfície plana de água pura na mesma temperatura (kPa).

Têm-se geralmente três tipos de psicômetros:

3.4.1.1 - Termistores:

Ideais para medições de temperaturas por seu alto coeficiente de resistência de temperatura. Usam a técnica baseada na determinação da temperatura do bulbo seco e no úmido. Por necessitar da colocação de uma gota de água destilada no bulbo úmido que influencia na sua calibração de por seu tamanho (RICHARD, 1965). Este tipo não é muito recomendado para uso em campo.

3.4.1.2 - Termo-Par:

O seu funcionamento se baseia no efeito Peltier. Pode ser usado ou como higrômetro ou psicômetro. Nos dois casos, a passagem de uma corrente de “esfriamento” provoca a condensação de gotas de água na junção de medição.

3.4.1.3 - Transistores:

São equipados por transistores e baseiam-se no principio de bulbos de umidade e seco. Por necessitar de gota de água no seu sistema, são geralmente usados em laboratório.

3.4.2 - Sensores de condutividade elétrica:

BOYOUCUS & MICK (1940) e posteriormente AITCHISON & BUTLER (1951 In: MARINHO, 1998) e AITCHISON & RICHARDS (1965) foram os precursores desta metodologia de determinação de sucção. Os sensores de condutividade elétrica são

elementos porosos nos quais são inseridos pares de eletrodos. Em função do grau de saturação obtém-se uma resistência entre o par de eletrodos. Iniciando do grau de saturação de 100%, no bloco ocorrerá uma perda de água num determinado valor de sucção a partir do qual tem-se o registro de alteração da resistividade. Os materiais utilizados são a fibra de vidro, nylon e principalmente o gesso, observando os seguintes aspectos.

- A sua utilização é simples no laboratório e no campo e seu intervalo de medição de sucções fica entre 20 kPa e 1500 kPa.
- O sensor é altamente influenciado pelo fenômeno de histerese.
- A sua calibração é dependente do espaçamento entre os eletrodos e do contato entre estes com o gesso.
- O gesso tem vida útil pequena variando entre 3 e 5 anos dependendo do ambiente de uso.
- Os valores medidos são influenciados pela solução da água e pela variação de temperatura.
- A sua eficiência osmótica na manutenção da concentração de sais da água por mais tempo.

O elemento sensor quando colocado em contacto com o solo, iniciará um fluxo de água provocado pela diferença de potencial entre o elemento poroso e o solo. Ao se atingir o equilíbrio o solo circundante e o sensor têm o mesmo potencial. Determina-se uma calibração em relação à sucção matricial aplicada relacionando a umidade do solo com a condutividade térmica do sensor.

3.4.3 - Papel filtro:

HANSEN (1926), guiado pelo conceito de SHULL (1916) que usou o fenômeno de absorção de água por sementes para determinar sucção do solo, usou o papel filtro na determinação de sucções, saturando-o previamente com uma solução de açúcar cuja pressão de vapor era conhecida e colocando-o num ambiente fechado sem contato com o solo até que se atingisse o equilíbrio. A seguir o papel era pesado e dependendo de seu ganho ou perda em peso. Ter-se-ia uma elevação ou redução de medida com a pressão de vapor da solução usada. GARDNER (1937) usou pela primeira vez papel filtro sem pré - saturação como absorvente e o método parecido ao de SHULL (1916) teve

credibilidade garantida pelo processo industrial aplicado na sua produção garantindo que as características de absorção de cada papel filtro sejam constantes (FAWCETT & GEORGE, 1967).

O princípio do papel filtro é baseado no fato que, quando um solo úmido está em contacto com um material poroso e absorvente, a umidade do solo passará para o material poroso até atingir um equilíbrio entre ambos. Havendo uma correlação entre sucção e umidade do material poroso, pode-se determinar a sucção do solo, pois ambos terão sucções iguais mesmo com umidades diferentes, quando estarão em equilíbrio. Portanto o tempo de equilíbrio é o principal fator para determinação da sucção correta.

Os papéis filtro mais utilizados são o Schleider & Schuell N°589 e o Whatman N° 42, (FAWCETT & COLLIS-GEORGE, 1967; MAC QUEEN & MILLER, 1968; CHANDLER & GUTIERREZ, 1986). Os papéis filtro devem ser usados no seu estado seco ao ar (diretamente da caixa). O papel filtro Whatman N° 42 apresenta uma umidade inicial no estado seco ao ar de aproximadamente 6% , podendo atingir a máxima sucção até 29Mpa no contato com o solo.

Deve se garantir na calibração o equilíbrio do papel filtro numa sucção conhecida. Após o equilíbrio, retira-se e pesa-se imediatamente o papel. Após seco em estufa a 105° C durante no mínimo duas horas pesa-se novamente o mesmo (MARINHO, 1998). Segundo CRILLY & SCHREINER (1991), deve-se usar uma balança analítica graduada com precisão de até a quarta casa decimal (com um erro aproximado de 0,0001g, na pesagem). Relaciona-se então a umidade obtida com a sucção gerada por ensaio de placa de sucção. Deve-se evitar perda de umidade na remoção do papel filtro, após equilíbrio. Para uma umidade próxima de 35%, a perda de umidade fica em torno de 1.5% por minuto (MARINHO, 1998), mas esta perda é dependente da umidade do papel. Em altas sucções (baixas umidades) tem-se menor evaporação e deve se selar rapidamente o papel quando retirado da estufa a fim de evitar a sua absorção da umidade do ar.

O papel filtro pode ser usado na determinação de sucções matricial ou total.

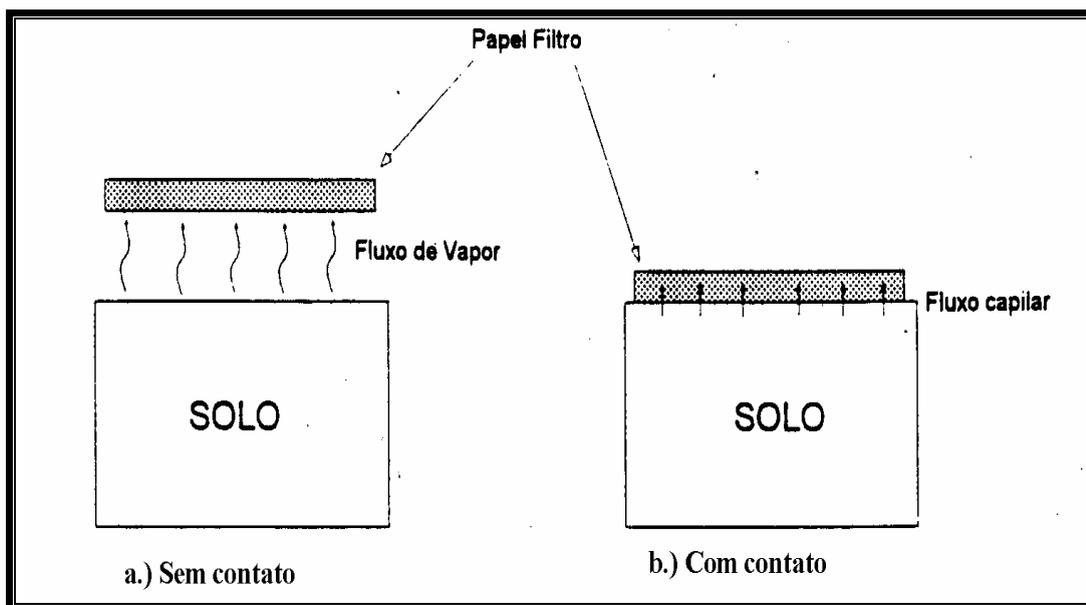


Figura 3.7: - Tipos de fluxos do solo para o papel filtro (MARINHO, 1998).

A determinação da sucção total se faz com o papel sem contato com a água do solo, Figura 3.7a. Ocorre um fluxo de vapor onde as moléculas de água têm que vencer as forças capilares dos poros do solo e também as forças osmóticas que agem pela presença de sais. A distância entre o papel filtro e o solo serve de barreira para os sais e permite apenas o fluxo de vapor de água. Neste caso, segundo MCQUEEN e MILLER (1968), quanto mais baixo o valor da sucção, maior será o tempo de equilíbrio. MARINHO (1994) mostrou que há um aumento da umidade do papel filtro com o tempo de teste e uma forte influência da distância entre o papel e a fonte de vapor. Aplica-se um dispositivo dentro do qual coloca-se o papel-filtro e introduz-se o dispositivo no solo, garantindo que não haja contato solo / papel-filtro.

Quando o papel filtro está em contato direto com a água dos poros do solo, Figura 3.7b, determina-se a sucção matricial. O fluxo de água se determina por ascensão capilar através das partículas do solo e das fibras do papel filtro sem perda de continuidade da água. Isso implica numa interação entre o papel filtro e a solução nos poros do solo. Segundo GEACEN *et Al.* (1987) grande parte da água é absorvida nos primeiros minutos e depois a absorção diminui até atingir o equilíbrio por volta de 7 dias. No entanto, o contato do papel com a amostra o solo foi indicado como o principal problema deste método (AL-KHAFRAF & HANKS, 1974; SCHREINER, 1988; CRILLY *et Al.*, 1991; CRILLY and CHANDLER, 1993; FREDLUND and RAHARDJO, 1993).

O método papel filtro pode ser aplicado para determinação da curva característica do solo de secagem (MARINHO e CHANDLER, 1993) e de molhagem (MARINHO, 1994).

3.4.4 - Os tensiômetros:

De acordo com FLEMING (1993), os primeiros tensiômetros foram desenvolvidos nos anos 20 com finalidade de mensuração de pressão capilar no solo e tinham a denominação de potenciômetros capilares. HECK (1934) usou-os como higrômetros e ROGER (1935) como medidor de umidade do solo. A descrição adequada do equipamento advém do trabalho de RICHARD & GARDNER (1936). Pode-se descrever o princípio de funcionamento do tensiômetro com simplicidade da seguinte forma: a água sob tensão nos poros do solo provoca a sua passagem aos poros da pedra cerâmica e cria uma tensão de tração na água do reservatório, tensão esta mensurada pelo transdutor (W. A. TAKE & M. D. BOLTON, 2002).

São equipamentos de medição direta de sucção matricial. Os tensiômetros são compostos por: um elemento poroso, um corpo cilíndrico, um sensor de pressão e água.

- O elemento poroso:

Geralmente é uma pedra porosa de cerâmica e desenvolve uma função primordial como interface entre solo, água e sistema de medição.

As pedras porosas de cerâmica são naturalmente molháveis e são hidrofílicas. Pedras porosas de cerâmicas são geralmente inertes e podem ser produzidas com uma grande consistência e uniformidade da estrutura de seus poros. As pedras com estrutura e elementos fabricados com paredes grossas podem sofrer cargas elevadas numa instalação mecânica sem danos. Existem dois tipos de pedra porosa cerâmica em relação a sua estrutura como mostrado nas figuras abaixo em cortes longitudinal e transversal:

As pedras de estrutura porosa fechada podem ser vistas na figura 3.8-1.

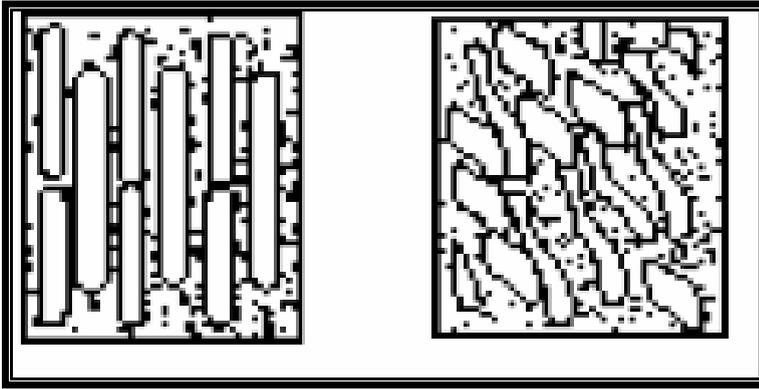


Figura 3.8-1: - Estrutura de pedra porosa fechada – vista em corte longitudinal e transversal. (SOIL MOISTURE®)

Como diz o próprio nome, é um material no qual seus caminhos ou canais são bloqueados e não proporcionam ao fluido uma rede contínua e interconectada no canal da face do material à face oposta.

As pedras de estrutura porosa aberta podem ser vistas na figura 3.8-2.

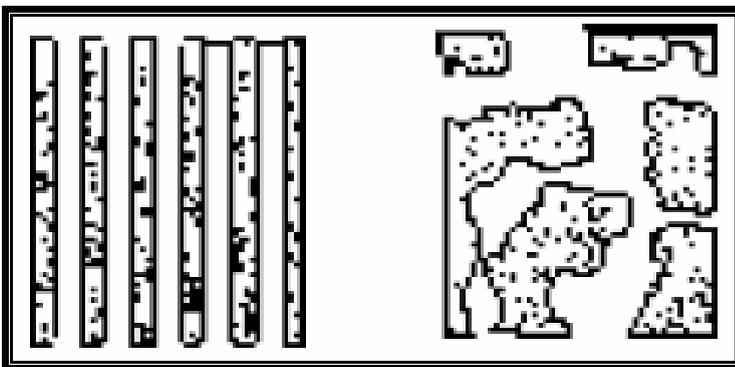


Figura 3.8-2: - Estrutura de pedra porosa aberta – vista em corte longitudinal e transversal (SOIL MOISTURE®)

A estrutura aberta dos poros significa que o material permite ao fluido mover-se da face superior à face oposta sem interrupção da interconexão do canal de caminho tortuoso.

Existem vários tipos de pedras porosas com dimensões, e permeabilidades diferentes. Essa diferença de permeabilidade faz com que as pedras tenham um

comportamento diferenciado na sua função de manutenção da continuidade hidráulica do fluxo entre o solo e sistema de medição. A variação do fluxo depende da granulometria e esta governa a ausência ou presença de ar no sistema. A ausência de ar no sistema é também amenizada pelos novos modelos de pedras empregadas que são de alta pressão de borbulhamento. Na Tabela 3.2, conforme FREDLUND & RAHARDJO (1993), são apresentadas as diferentes permeabilidade e pressão de entrada de ar em discos porosos.

Tabela 3.2: - Permeabilidades e pressão de entrada de ar em discos porosos (FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

Tipo de pedra porosa	Diâmetro da pedra porosa (mm)	Espessura da pedra porosa (mm)	Pressão de entrada de ar (Kpa).	Coefficiente de permeabilidade (m/s)
1bar	19	6,4	115,0	$5,12 \times 10^{-8}$
"high flow"	19	6,4	130,0	$3,92 \times 10^{-8}$
	19	6,4	110,0	$3,98 \times 10^{-8}$
	19	6,4	130,0	$5,09 \times 10^{-8}$
	19	6,4	150,0	$5,60 \times 10^{-8}$
	101,6	10,0	> 200,0	$4,20 \times 10^{-8}$
5 bars	56,8	6,2	-	$1,30 \times 10^{-9}$
15bars	56,8	3,1	-	$8,41 \times 10^{-9}$
	57	3,1	-	$6,82 \times 10^{-10}$

- **Corpo cilíndrico**

Tem a função de reservatório da água e exige certos aspectos importantes para o bom funcionamento do equipamento como: uma superfície bastante lisa afim de não permitir fixação de bolhas de ar, uma boa resistência, inclusive à corrosão. Ele é geralmente constituído por aço, vidro ou acrílico. O tipo de material influencia a tensão de adesão desenvolvida entre este e o líquido contido.

- A água

A água garante a possibilidade de medição pela função em estabelecer uma continuidade hidráulica. A importância da água provém das suas características físicas e químicas que, por sua vez, resultam da sua estrutura molecular (KRAMER & BOYER, 1995). Dentre as suas características físicas e químicas, algumas desenvolvem um papel fundamental no funcionamento dos tensiômetros:

- **COMPRESSIBILIDADE:** Para todos os efeitos práticos os líquidos são incompressíveis.

- **ADESÃO E COESÃO:** Devido à sua polaridade a água é atraída por muitas outras substâncias, ou seja, é capaz de molhar superfícies formadas por essa substância. Esta atração entre moléculas diferentes é chamada **adesão**, e é devida às pontes de hidrogênio que se estabelecem entre moléculas. A atração entre moléculas semelhantes é chamada **coesão**. São as forças de coesão que conferem à água uma **força de tração** invulgarmente elevada, isto é, a tensão máxima que uma coluna ininterrupta de água pode sofrer sem se romper é extremamente elevada (HOPKINS, 1995). Numa coluna de água fina e confinada, como as que existem no xilema dum caule, a força de tração pode atingir valores muito elevados (cerca de -30 MPa) de modo a que a coluna de água é “puxada” sem interrupções até o topo de árvores. Este valor representa cerca de 10% da força de tração do fio de cobre ou de alumínio, o que é de fato considerável (TAIZ & ZEIGER, 1998).

- **TENSÃO DE SUPERFÍCIE:** É a coesão entre moléculas de água que permite explicar a elevada tensão de superfície deste composto. As moléculas à superfície dum líquido estão continuamente sendo atraídas para o interior do líquido pelas forças de coesão, enquanto que na fase gasosa há menos moléculas que, por isso, estão muito distantes para exercer uma força sobre as que estão à superfície. Assim, uma gota de água atua como se estivesse coberta por uma “pele” apertada e elástica. É a tensão de superfície que faz com que uma gota tenha uma forma esférica, e que permite que certos

insetos andem sobre a água. A tensão de superfície da água é maior que a da maior parte dos líquidos.

• **SOLUBILIDADE:** Uma das características principais da água é a sua capacidade de dissolver quase todas as substâncias em quantidades superiores à maioria dos líquidos.

A ação dissolvente da água depende de pelo menos um dos três tipos de interações entre as moléculas de água e as moléculas de solutos:

1. Substâncias não ionizáveis, mas polares: São substâncias que contêm oxigênio ou azoto na forma de grupos — OH, — NH₂, a sua solubilização é devida à formação de pontes de hidrogênio entre as suas moléculas e as da água.

2. Substâncias ionizáveis: A sua solubilidade deve-se ao caráter dipolar da água que lhe confere uma **constante dielétrica**, isto é, a capacidade de neutralizar a atração entre cargas elétricas muito elevadas. Cada íon em solução tem como que uma “concha” de moléculas à sua volta. Esta “concha” atua como um campo de isolamento elétrico que diminui a força de atração entre íons com cargas opostas, mantendo-os afastados na solução.

3. Substâncias não polares: Como, por exemplo, a alanina e outros amino ácidos neutros. Estes compostos dissolvem-se na água por causa das forças de Van der Waals.

- **O sensor de pressão**

A sua função é a mensuração da tensão local do solo. Existem basicamente três tipos, além dos transdutores de pressão conforme ilustrado na Figura 3.9.

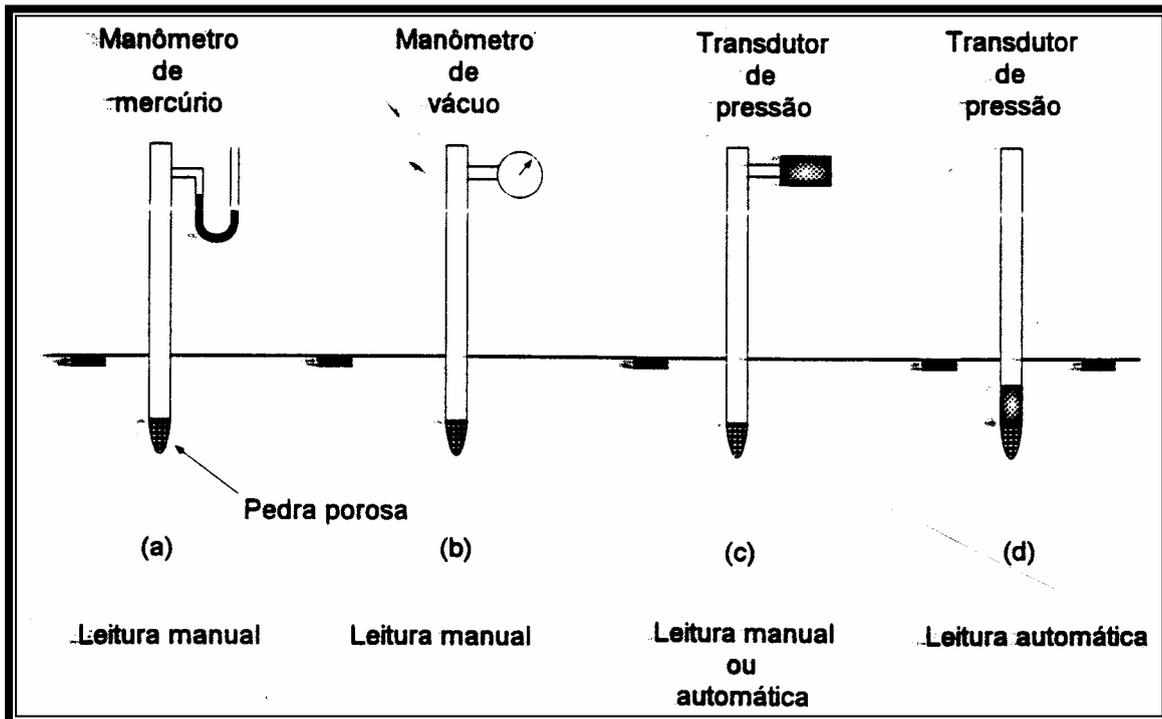


Figura 3.9: - Sistemas de medição de sucção em tensiômetros (MARINHO, 1994).

1. Manômetros de mercúrio: Não necessitam de calibração, mas precisam de correção da densidade para evitar um erro de leitura de ordem de 0,25%. No entanto são os mais simples e acurados sensores de pressão.

2. Manômetros de vácuo: São de fácil manutenção, mas de acurácia baixa e medem tensões entre 0 e 1 Atm. O elemento de vácuo posiciona-se quase na base do tubo do tensiômetro e assim o espaço superior serve de captação de ar.

3. Transdutores de pressão: Quando devidamente calibrados, desenvolvem alta acurácia e precisão. A necessidade do pouco fluxo de água para o seu equilíbrio com o solo reduz o tempo de resposta e a interferência da água do sistema no solo. Permitem acúmulo de grande quantidade de dados e favorecem um monitoramento contínuo. O elemento medidor é geralmente resistivo como um *strain-gage*, e sempre acoplado a um diafragma, que quando nele é aplicada uma tensão, se deforma e causa uma variação de resistência no *strain-gage*. A Tabela 3.3 a seguir apresenta as principais características de tensiômetros em função do sensor de pressão (STANNARD, 1992).

A faixa de mensuração observada nos tensiômetros não ultrapassava -100 kPa devido à problemas de cavitação do sistema. Mas com os novos tensiômetros de alta sucção, este problema foi solucionado.

Tabela 3.3: - Características principais de tensiômetros (FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

característica	Manômetro de vácuo	Manômetro de mercúrio	manômetro		transdutores	
			Pequeno diâmetro	híbrido	Pequeno diâmetro	híbrido
acurácia	R	E	E	E	B a E	B a E
precisão	R	B	B	B	E	E
Histerese	R	E	E	E	RZ a E	RZ a E
Tempo de resposta	R a E	RZ	RZ	RZ	E	E
Versatilidade de aplicação	RZ	RZ	E	RZ	E	RZ
durabilidade	B	B	B a E	B	B	B
deareção	raramente	ocasionalmente	freqüentemente	ocasionalmente	freqüentemente	ocasionalmente
recalibração	ocasionalmente	nunca	nunca	nunca	freqüentemente	freqüentemente
Método de obtenção dos dados	manual	manual	manual	manual	Manual ou automática	Manual ou automática
Custo	\$260	\$200	\$120	\$150	\$410	\$440
R - ruim; RZ - razoável; B - boa; E - excelente.						

3.4.5 - Tensiômetros de alta sucção (Estado da Arte)

TABOR (1979) demonstrou teoricamente que a resistência à tração da água fica por volta de -500 MPa (RIDLEY & BURLAND, 1993).

Partindo desta tese, RIDLEY (1993) e RIDLEY & BURLAND (1993) apresentaram o primeiro equipamento capaz de medir tensões da ordem de 1 MPa.

KÖNIG e Al (1994) usaram um tensiômetro para medida de poro pressão em centrífuga, o Druck PDCR-81. Este dispositivo consiste de um instrumentado diagrama de silicone preso a um cilindro de vidro interno e conectado ao elemento poroso pela caixa protetora externa de aço conforme Figura 3.10-1. Usando um dispositivo de grande escala de medição, com uma pedra de 15bar de entrada de ar, saturada a uma pressão de 2000 kPa, RIDLEY (1994) foi capaz de medir sucções mais ou menos superiores a 1370 kPa. RIDLEY (1994) relatou que o amplo deslocamento externo do diafragma com a larga pressão negativa podem comprometer a integridade da ligação entre o diafragma e o suporte do cilindro de vidro. Como consequência, a água esta livre para entrar nas cavidades do dispositivo, provocando o resultado suspeito de medida de pressões para ambos os casos negativos e positivos.

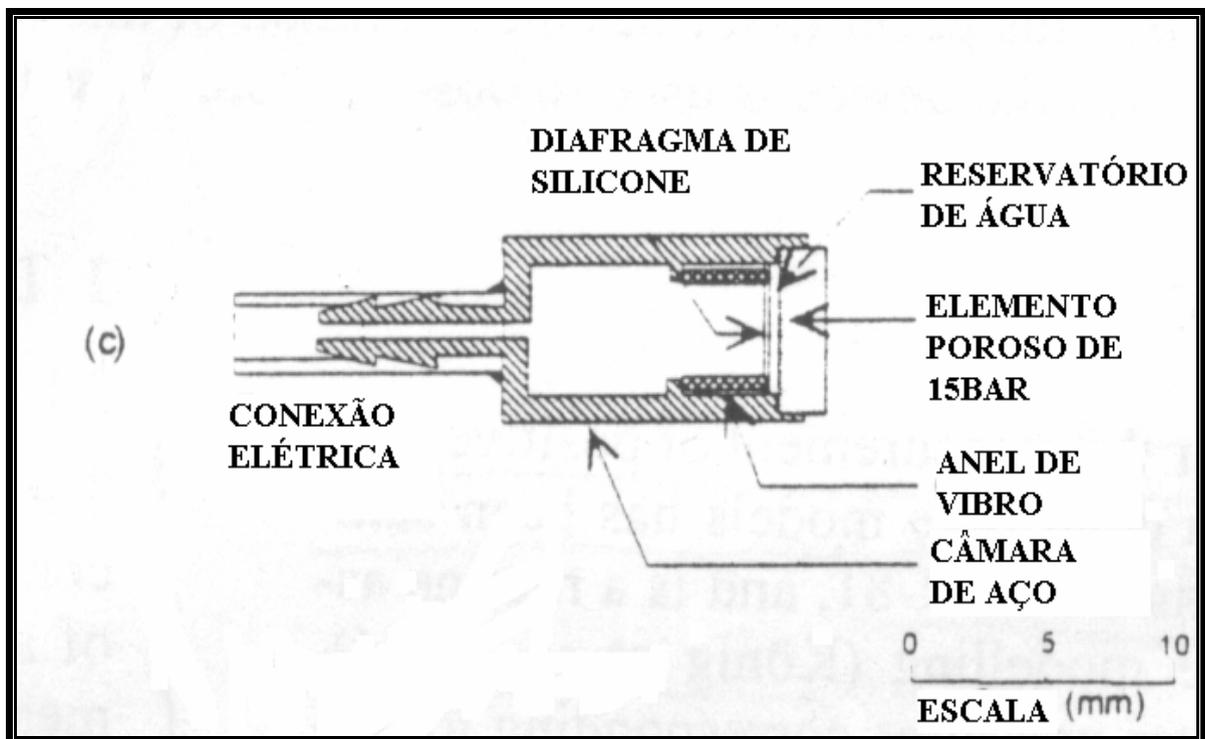


Figura 3.10-1: - (KÖNIG et al, 1994)

RIDLEY E BURLAND (1995), apresentaram um outro protótipo, baseando-se no princípio de maximização da tensão sustentável em tensiômetros para medir sucções elevadas em solo. Este tensiômetro desenvolvido no *Imperial College* possibilita medidas in-situ de sucções da ordem 1500 kPa. O equipamento consiste de um diafragma de *strain-gage* integrado e de um elemento poroso em cerâmica selado com um valor de 15 bar de entrada de ar como mostrado na Figura 3.10-2.

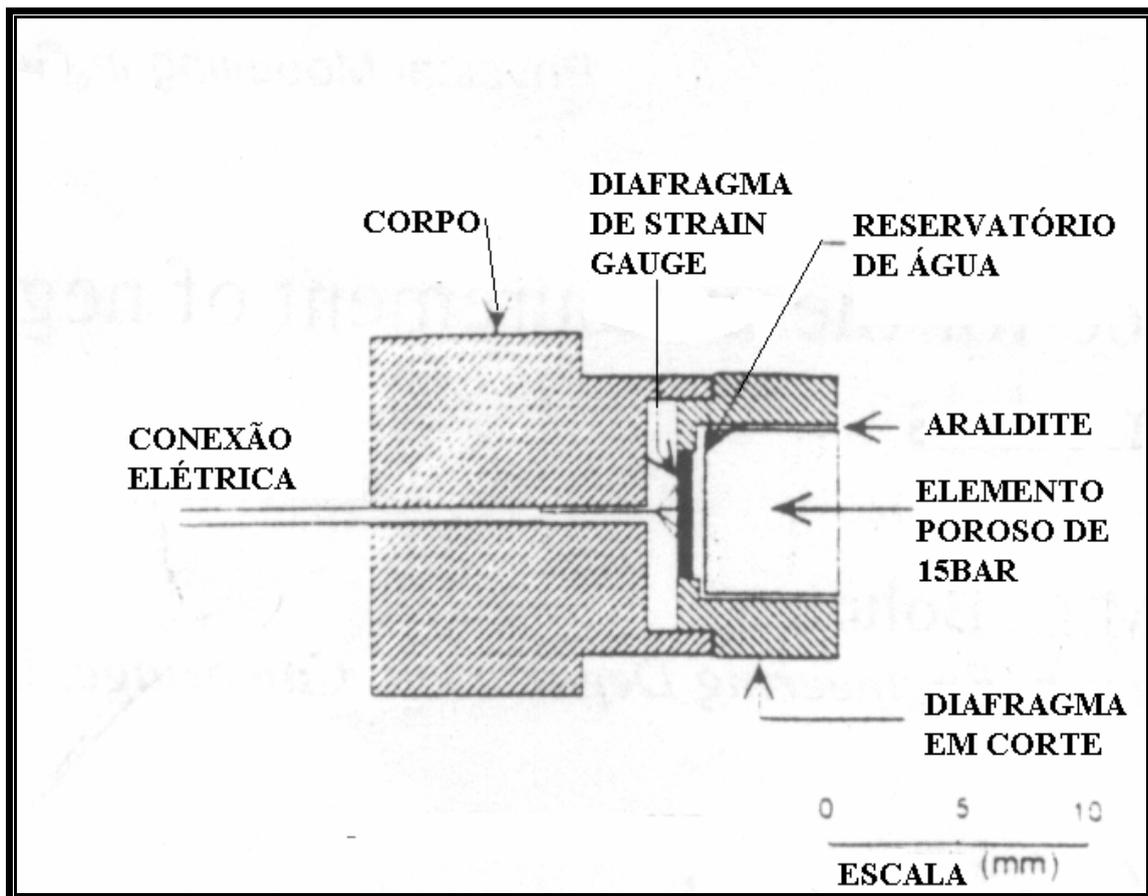


Figura 3.10-2 - (RIDLEY and BURLAND, 1995)

GUAN E FREDLUND (1997), Similarmente, apresentaram o tensiômetro desenvolvido na *University of Saskatchewan* com medidas de sucção em solos superiores a 1250 kPa quando saturado sob seis ciclos de pressão entre 12000 kPa a -85 kPa (GUAN and FREDLUND, 1997). A pedra cerâmica de alto valor de entrada de ar é selada pela metade numa caixa destacável do dispositivo. Montado dentro da água, a outra metade da caixa atua como elemento de compressão ajustando e selando o transdutor comercial no reservatório de água conforme mostrado na Figura 3.10-3.

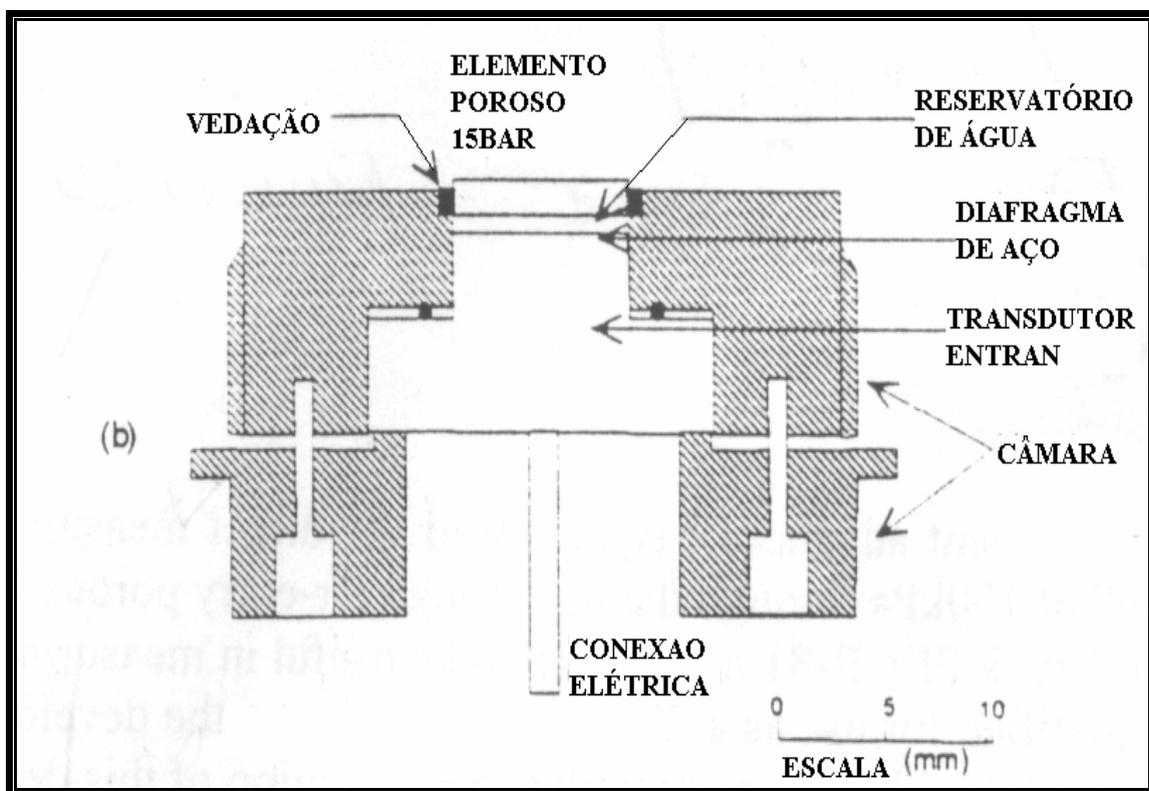


Figura 3.10-3 – (GUAN and FREDLUND, 1997)

PACHECO, A.C. (2001) desenvolveu um tensiômetro de baixo custo como mostrado na Figura 3.10-4a e b, com medições até mais de 3 Atm sem que ocorresse a cavitação e concluiu que: “O reduzido volume de água utilizado na interface entre o transdutor e a pedra porosa do novo instrumento e o processo de saturação, inibiram a formação de bolhas de ar no interior do sistema, e geraram medidas de sucção acima de 3 ATM; sendo que até 1,5 ATM com um tempo de resposta de poucos segundos”.

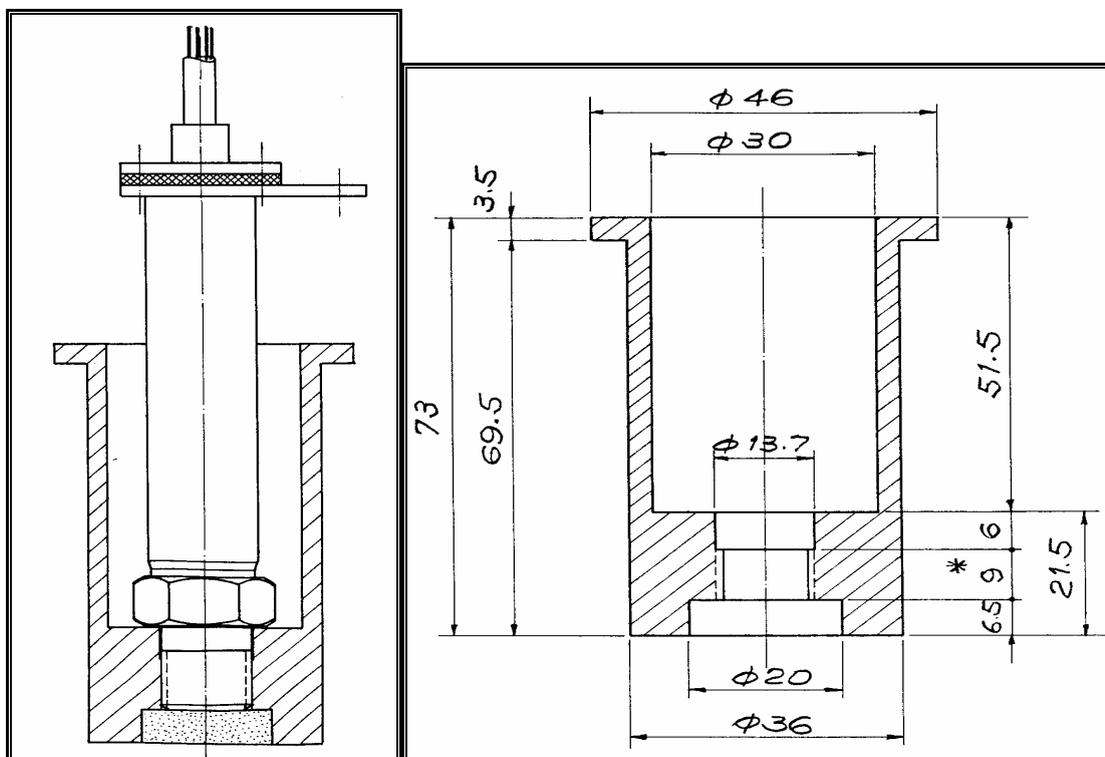


Figura 3.10-4 a e b: (PACHECO, 2001)

W. A. TAKE & M.D. BOLTON (2002) querendo superar a alta perda de ‘Druck PDCR-81’, conceberam novos instrumentos mais robustos para medição de poro pressão negativa em centrífuga. Para tal, optaram em desenvolver três protótipos apresentando algumas particularidades de formato para cada um. Em comum, os protótipos foram equipados de um transdutor Entrán EPB de 7bar e uma pedra porosa de 15 bar, conforme a Figura 3.10-5.

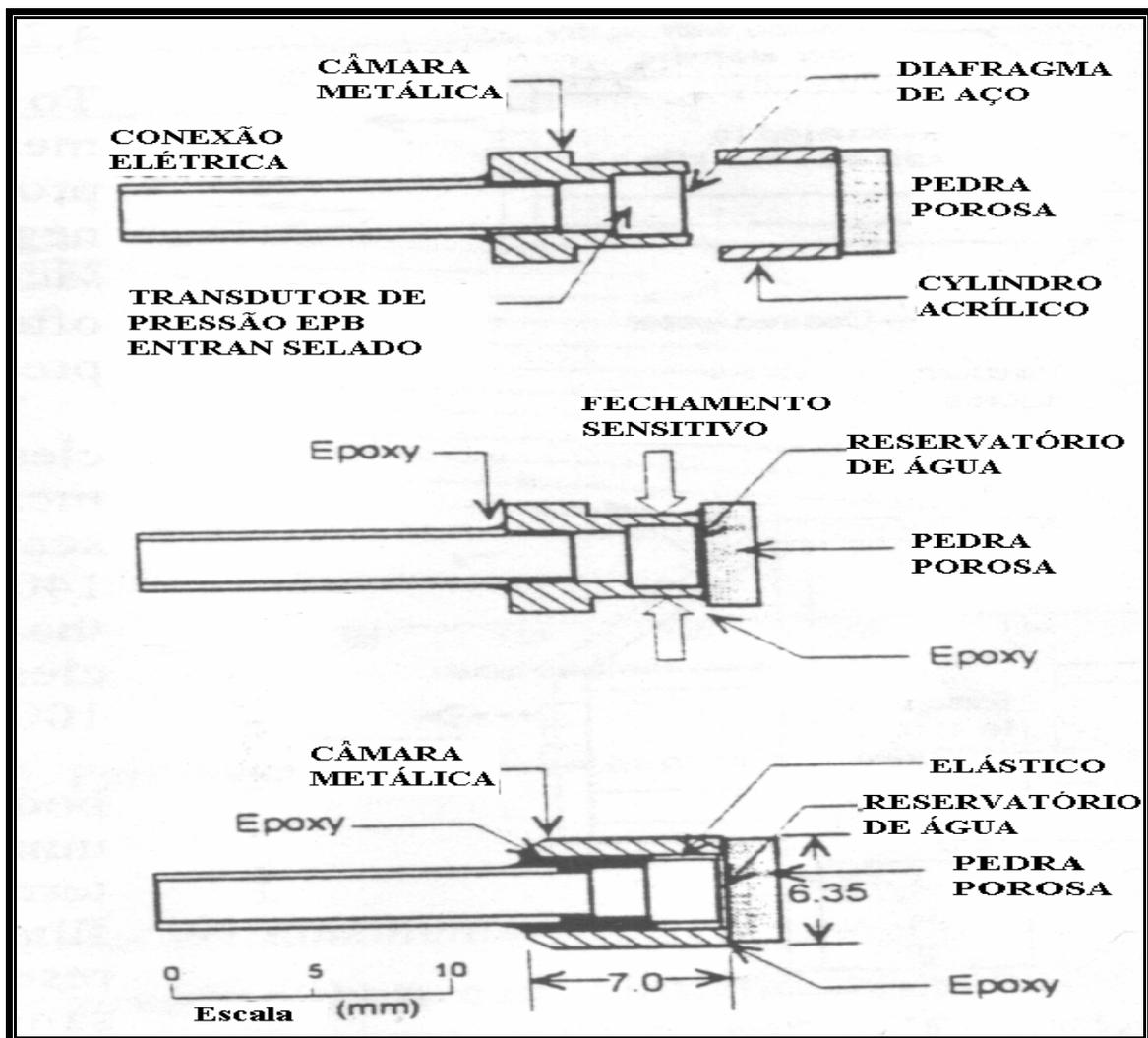


Figura 3.10-5:-(W.A. TAKE & M. D. BOLTON, 2002)

A. TARANTINO & L. MONGIOVI (2002) apresentaram um novo tensiômetro parecido com o de RIDLEY & BURLAND (1995), mas com várias modificações no diâmetro e espessura do diafragma, no tamanho reservatório de água e no fechamento da abertura anular entre a pedra porosa e o corpo do tensiômetro conforme Figura 3.10-6. Este novo equipamento mediu sucções acima de 1000 kPa durante um tempo superior 15 dias e atingiu a máxima tensão negativa de 2MPa.

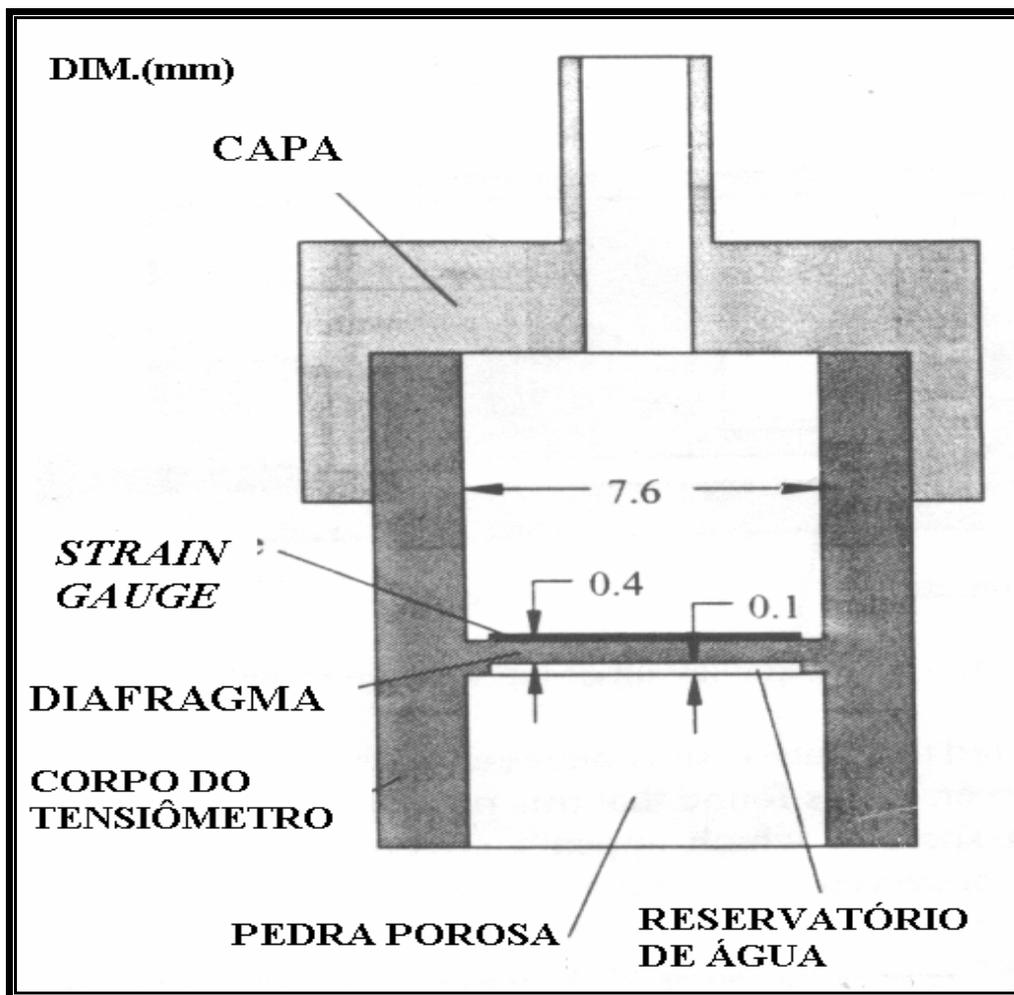


Figura 3.10-6:- A. TARANTINO & L. MONGIOVI (2002)

•Um problema comum a todos estes equipamentos é o fenômeno de cavitação que se manifesta como a interrupção, mesmo momentâneo, da leitura do transdutor. Dentre os vários modelos explicando o fenômeno de cavitação de água sujeita a tensão de tração, o mais aceito é uma das proposições de HARVEY e AL. (1944): “assume-se que a cavitação origina-se dos núcleos de gases não dissolvidos que existem nos interstícios das paredes do reservatório em vez das cavidades livres do líquido”; isso pelo fato que o núcleo esférico de gás livre é geralmente instável e tende a ir para o interior do líquido. Ao contrário, o núcleo de gás nas cavidades das paredes do contêiner pode ficar indissolúvel mesmo sob alta pressão de água. Quando a pressão decresce para valores negativos, estes núcleos podem se expandir e eventualmente gerar a cavitação. Este processo é controlado por difusão de gases através da fronteira gás-líquido e movendo-se furtivamente na junção gás-líquido-sólido determinado pelo avanço e retrocesso (ângulo de contato voltado para dentro). Os ensaios de tração da água são determinados por físicos usando-se vidro ou aço inox em tubo de Berthelot. Este tubo é inicialmente quase que completamente preenchido com água e o volume restante é ocupado pela mistura de vapor de água e ar. O tubo é aquecido para expandir o conteúdo líquido e forçar a entrada do ar na solução. Subseqüentemente resfriado, o líquido adere às paredes do tubo e torna-se sujeito a tensões gradativamente crescentes até o rompimento no início da cavitação.

•Para inibir o fenômeno de cavitação nos equipamentos, varias soluções foram propostas por diversos autores, que se resumem em procedimentos aplicados na montagem ou na saturação e / ou calibração dos mesmos. Destas propostas nasceram algumas conclusões referente a como evitar a cavitação. RIDLEY (1993) assumiu que a máxima tensão sustentável pelo tensiômetro é também função do valor de entrada de ar do elemento poroso. “Se a diferença de pressão entre o reservatório e a medida no solo exceder o valor da entrada de ar, este pode ser “puxado” de dentro do reservatório de água; mudanças de pressões externas que atuam no dispositivo vão resultar na expansão ou contração das bolhas do ar e a pressão medida é potencialmente destacada da realidade”. MARINHO & CHANDLER (1995) designaram o uso de um volume pequeno de água no sistema de medição de sucção por responsável para que não aconteça cavitação, e que o volume mínimo possível está limitado pelo deslocamento do

diafragma do transdutor. A pré-pressurização da água tem sido considerada essencial para a saturação dos tensiômetros em ambas as universidades (*Imperial College* e *Saskatchewan*). Algumas diferenças podem existir entre as duas metodologias de pré-pressurização. GUAN & FREDLUND (1997) aplicam várias pré-pressurizações em ciclos que começam sob um vácuo de -85 kPa seguido por pressões positivas maiores que vão até 12000 kPa. De fato tem sido sugerido que a tensão de rompimento é afetada preliminarmente pelo número de ciclos e a magnitude da pressão positiva aplicada (GUAN e AL., 1998). RIDLEY & BURLAND (1999) afirmaram que o processo da pré-pressurização é menos importante, enquanto isso, a saturação inicial da pedra porosa joga um papel mais importante. Estes autores propõem que se sature o tensiômetro pela aplicação de uma pressão constante de 4000 kPa que é mantida pelo menos 24 horas. TARANTINO, BOSCO E MONGIOVI (2000) fizeram medidas de sucções superiores ao valor de entrada de ar do elemento poroso sem que houvesse cavitação e concluíram que “cavitação pode ocorrer antes da equalização do sistema solo-equipamento, causando a interrupção do teste e a pré-saturação do instrumento; o conhecimento das condições que lidam com a cavitação é, portanto essencialmente baseado na otimização do design do instrumento e determinar um processo experimental adequado”.

- A cavitação não ocorrerá caso o sistema esteja livre de núcleos de cavitação, o que significa resumidamente, o uso de água deaerada pura e limpa, superfícies extremamente lisas e limpas, submissão do sistema ao vácuo, aplicação cíclica de pressões positivas e negativas e pré-pressurização do sistema a altas pressões para dissolver o ar livre.

3.4.6 - Tensiômetros osmóticos

Baseados na técnica de translação de eixos de pressão por osmose, PECK & RABBIDGE (1966) desenvolveram um tensiômetro osmótico. Este equipamento tem uma câmara preenchida com uma solução aquosa de polietileno glicol (PEG) da massa molecular 20000 kg/kgmol. BOCKING & FREDLUND (1979) desenvolveram um equipamento semelhante ao primeiro no seu princípio de funcionamento. Um transdutor de pressão sela a parte superior da câmara e mede a pressão interna da solução. Uma membrana semipermeável sela a parte inferior onde está fixada uma pedra porosa de alta pressão de borbulhamento. As pressões medidas variam de $1,4$ a 2 Mpa.

CAPITULO 4: - DETERMINAÇÃO DE TEOR DE UMIDADE.

O teor de umidade é um parâmetro muito importante em física dos solos. Existe uma abundante literatura tratando de sua medição (SHMUGGE et Al. 1980; GARDNER, 1986; MUSY e SOUTTER, 1991; TOPP,1993). Propõe-se aqui uma apresentação sintética dos diferentes métodos aplicáveis fazendo ampla referência á estes autores e descrevendo os protocolos experimentais correspondentes e discutindo fontes de incertezas.

4.1 - Amostragem direta

O único método direto de determinação de teor de umidade de um solo consiste na coleta direta de amostras. As amostras são pesadas e depois secas na estufa a 105° C até atingir um peso constante o que pode demorar ate tempos máximos de 24 a 48 horas.

$$w = \frac{m_w - m_s}{m_s} \quad (4.1)$$

Por causa das pesagens realizadas, chama-se de gravimétricos tais processo de determinação dos teores de umidade. Para passar do valor de teor de umidade mássica w ao teor de umidade volumétrica q , deve-se saber a densidade relativa das partículas d do solo. Tem-se então:

$$q = d.w = \frac{g_g}{g_w}.w \quad (4.2)$$

g_g : peso específico das partículas

g_w : peso específico da água.

4.2 – Sonda de Nêutrons

Trata-se de tirar proveito da interação dos nêutrons rápidos com o núcleo de hidrogênio da água do solo. Para tal, usa-se uma sonda chamada á nêutron, compreendendo uma fonte radioativa de nêutrons rápidos e um detector (Figura 4.1). Este método consiste em medir a taxa de nêutrons “neutralizados” (amortecidos por seu grande número de colisões com os diferentes núcleos presentes no meio) e retro-difundidos no detector. Este é constituído de uma célula contendo um gás que tem a propriedade de absorver os nêutrons amortecidos emitindo partículas a detectadas pelas

impulsões elétricas que elas criam num fio carregado. Estas impulsões elétricas são transmitidas por um cabo a um sistema eletrônico de contagem.

Os nêutrons emitidos pela fonte são essencialmente <retro-difundidos> pelos átomos de hidrogênio da água presente na interior de um certo volume na esfera de influencia.

A taxa de contagem é então proporcional à densidade volumétrica deste átomo e existe uma relação sensivelmente linear entre a taxa de contagem e o teor de umidade volumétrico.

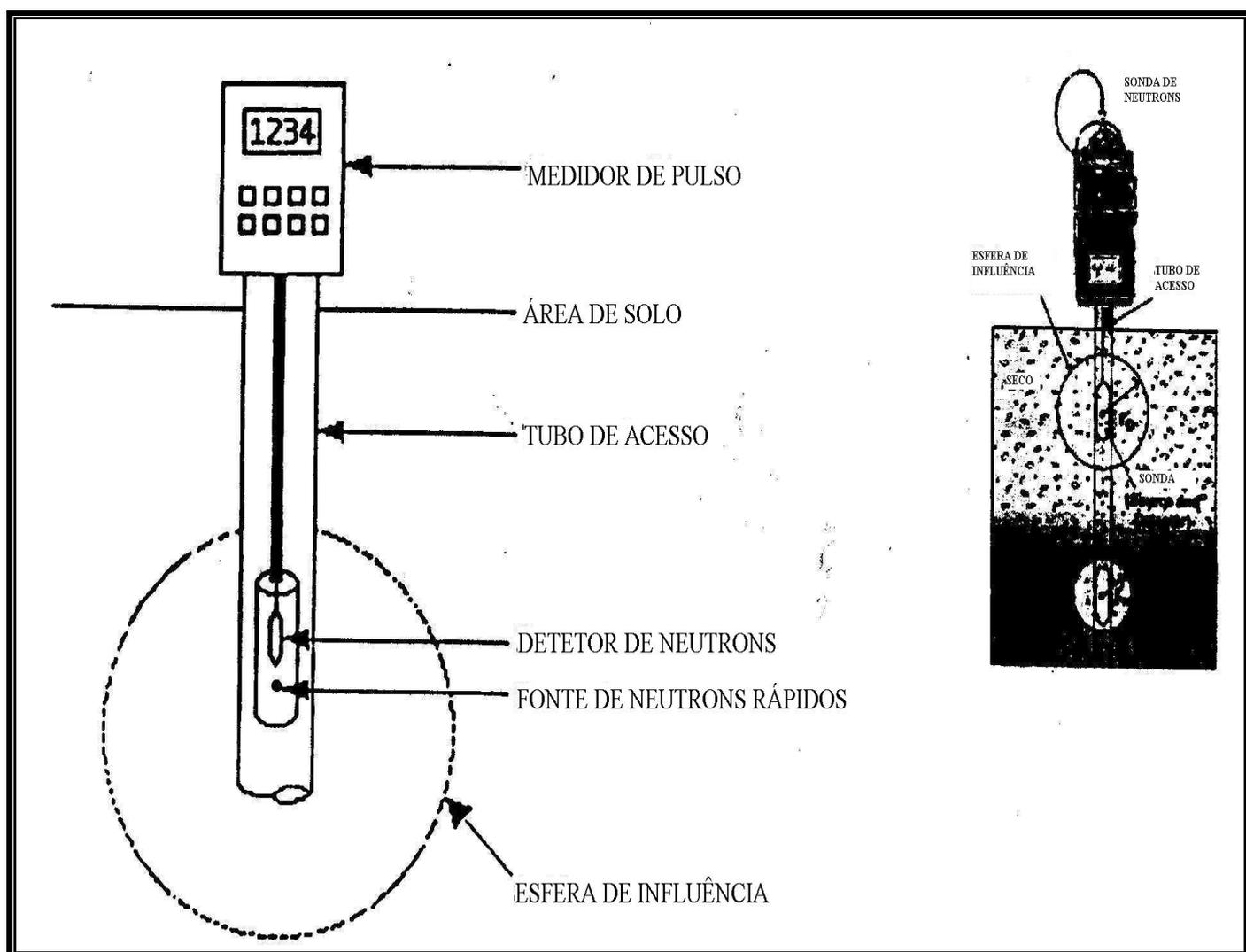


Figura 4.1: - Sonda a Nêutron (GAIDI, L., 2002)

4.3 - Sonda capacitiva:

Este método necessita de um material mais econômico e consiste em medir a capacitância de uma sonda colocada no solo. Introduzindo eletrodos no solo, forma-se um condensador cuja capacidade C_a é dada por:

$$C_a = a.k.e_0 \quad (4.3)$$

e_0 - constante dielétrica do vácuo,

k - permissividade elétrica relativa do solo.

a - um coeficiente que não depende que da geometria da sonda capacitiva utilizada.

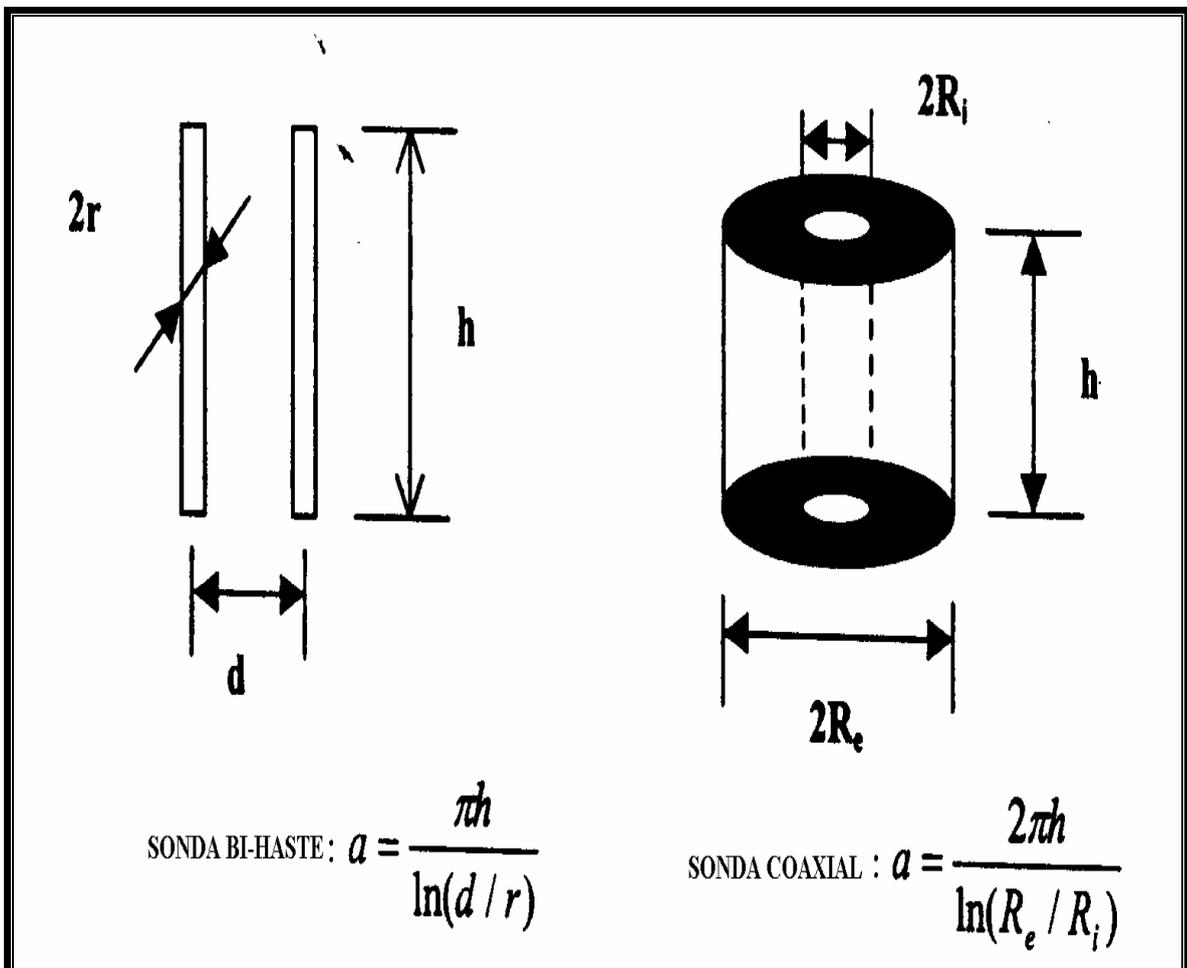


Figura 4.2: Dois tipos de geometria simples de sondas capacitivas (GAIDI, L., 2002)

Do fato do contraste existente entre a permissividade elétrica da maioria dos minerais e a da água ($k_e=80$), k e C_a são altamente dependentes do teor de umidade.

4.4 – Reflectometria no domínio do tempo. (TDR)

Vários pesquisadores segundo G.C.TOPP, F.N.DALTON (1997.) mostraram no início dos anos oitenta que é possível medir o teor de umidade utilizando um sistema de reflectometria no domínio temporal (TDR. Time Domain Reflectometry).

4.4.1 - Princípio:

Segundo FELLNER & FELDEGG (1969) o funcionamento do TDR é baseado num gerador de ondas, que emite um pulso eletromagnético para um conjunto de hastes, e é sensível a mudanças pelo conteúdo da água entre as hastes. Na medida em que o pulso encontra uma mudança no conteúdo médio de água entre as hastes, a porção de energia do pulso é refletida, voltando ao longo das hastes para o gerador. O tempo decorrido entre a reflexão do pulso que atravessa o solo e a reflexão final das hastes, pode ser medido em formas de ondas. A energia que retorna ao gerador de pulso é exibida como função do tempo pela “forma da onda” no display do instrumento. O tempo de percurso é definido como a média da velocidade de propagação da onda ao longo do comprimento da sonda (FERRÉ et Al., 1998). 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 14 descreve a relação da constante dielétrica (ϵ) com o tempo de propagação (t):

$$\epsilon = (c.t / 2.L)^2 \quad (4.4)$$

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.

4.4.2 – Tipos de sondas

Vários tipos de sondas podem ser utilizados para efetivar a medida de teor de umidade dos solos pelo método TDR:

- Sondas bi-hastes: são utilizadas correntemente in-situ, pois são mais fáceis de serem fabricadas e colocadas no local.
- Sondas tri-hastes: têm a vantagem sobre as precedentes de haver uma geometria que conduz a uma melhor definição do volume de medida.
- Sondas coaxiais: são utilizadas para os experimentos controlados no seio de um laboratório. Com estas sondas, o volume de medida é perfeitamente definido (trata-se de todo o volume presente no interior da armadura externa).

4.4.3 – Campos de aplicação do TDR

A aplicação da técnica de reflectometria no 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 destrutiva, para medições do teor de umidade do solo in-situ, é essencial para monitoramento e pesquisas em relação à resposta rápida da dinâmica hidrológica (WEILER et Al., 1998). É aplicada na agricultura para mensuração instantânea de solutos tendo bom desempenho na avaliação de parâmetros hidrológicos do solo (TOPP & DAVIS, 1985; DALTON & GENUCHTEN, 1986) e monitoramento ambiental. O TDR é utilizado na obtenção de dados para modelagem, atuando na verificação e ensaios de transporte de solutos e na determinação da transferência por infiltração da água e solutos em solos não saturados (GAIDI & ALIMI-ICHOLA, 2002); 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 da umidade do solo em tempo real, para ensaios de compactação.

4.4.4 - Fatores influentes no seu desempenho.

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) desenvolveram a idéia de se utilizar sondas de multi-hastes dispostas radialmente. 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 um sistema que coloque em fase as impedâncias emitidas, delimitando 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 sendo o espaçamento entre as hastes, condicionado pelo diâmetro das hastes. 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. Conseqüentemente 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 a sonda exatamente nesta profundidade. 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 têm 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 lóbulos 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 comentado.

Existem valores diferentes da constante dielétrica (ϵ) para cada material. 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, faz-se 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:

$$A(dB) = 20\log(VI / Vref) \quad (4.5)$$

Onde :

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

Vref. = 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, e observa que 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 causar 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 testadores de cabo conforme apresentado na equação (4.6):

$$R_L = R_S + R_{cabo} \quad (4.6)$$

Onde:

R_L = Resistência em função do comprimento do cabo

R_S = Resistência da amostra

R_{cabo} = Resistência do cabo

Então na equação (4.6) para condutividade elétrica (σ_{TDR}) tem-se:

$$S_{TDR} = K_P / (R_L - R_{cabo}) \quad (4.7)$$

Onde:

K_P = Constante da sonda

Em aplicações de campo, o comprimento dos cabos freqüentemente é maior que 2,0 m, o qual aumenta a resistência. A adição de supressores transientes conectados 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 macro-poros. 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 macro-poros 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 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, que seria da ordem de \geq a 30 cm de comprimento, para que não seja dificultada sua inserção no solo. NOBORIO et Al. (1996) determinaram a variação temporal e espacial da frente de umidade 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, 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 destrutiva de solo, principalmente em locais de clima árido onde o solo apresenta-se bastante duro. A técnica não destrutiva 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).

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 (EC_a) para a condutividade elétrica da água (EC_w), quando a relação linear entre estas quantidades seja assumida 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 feita 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 o modelo conceitual 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 repetitivo para solos em ensaios de colunas devido ao fluxo preferencial, desde que um período relativamente longo é exigido 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, seja evitada em solos com macroporos. KIM et Al. (1998) propõe o método indireto de calibração como o mais apropriado para se aplicar em investigações in-situ pela sonda TDR, posicionada horizontalmente.

Segundo FERRÉ et Al. (1998), apesar da habilidade da sonda de produzir alta resolução do conteúdo de água do perfil, várias limitações da mesma 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 próxima. 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, quando a mensuração do conteúdo de água e a condutividade elétrica são exigidas.

4.4.5 - Problema da determinação de um perfil

Com os métodos de medidas de teor de umidade no solo apresentados acima, desejando-se determinar o perfil de teor de umidade, tem-se de repetir as medidas a diferentes cotas. Isto supõe realizar uma escavação o que não é sempre possível. Existem três métodos << diretos >> de medidas dos perfis de teor de umidade no solo realmente operacionais in-situ:

- Método gravimétrico: efetua-se uma amostragem á trado manual ou mecânico.
- Método nêutrons: Colocação em obra de sondas a nêutrons num tubo de aceso em alumínio de comprimento podendo atingir 3 metros. Este tubo conduz à determinação de um perfil de teor de umidade.
- Sonda TDR<<tubo>>: estas sondas são desenvolvidas por IMKO, podendo ser introduzidas num tubo de fibra de vidro instalado no solo. Podem-se fazer medidas em diferentes cotas. Por causa da fragilidade do tubo em fibra de vidro, não se devem ultrapassar os 2 metros de profundidade.

Estes três métodos possuem vantagens e inconvenientes. O método gravimétrico necessita da determinação do perfil de densidade (CULLEY, 1993). O método dos nêutrons necessita de uma calibração e é importante assinalar que este método dá valores de uma zona limitada de solo: esfera de influencia de 10 a 25 cm de raio (COUCHAT, 1977; HILLEL, 1974). Enfim, vale observar que o sistema IMKO não fornece que valores médios sobre a altura da sonda e que ele é muito sensível aos problemas de contacto (AUZET et Al., 1996).

CAPITULO 5: LYSÍMETROS

5.1 – Histórico

Um lisímetro de maneira geral apresenta-se sempre como um bloco de solo com uma vegetação e com condições ambientais de preferência naturais razoavelmente monitoradas de uma forma melhor do que um perfil natural de solo. Os lisímetros apresentam-se geralmente em dimensões muito maiores do que aquelas usuais, mesmo em laboratório. Em 1688, o matemático e meteorologista DE LA HIREM usou tanques de chumbo, para uma das primeiras investigações em lisímetros, preenchidos com uma argila siltosa e detectou que havia mais água evaporada nos lisímetros com grama plantada na cobertura do que os com solo desprovidos de plantas.

Em 1870 na Inglaterra desenvolveu-se o primeiro lisímetro com bloco de solo indeformado. Em 1906 obteve-se o primeiro lisímetro com sistema de pesagem na Alemanha, aonde, em 1937 chegou-se a um modelo de lisímetro com sistema de medição automática. Nestes modelos foram registrados os principais componentes do ciclo hidrológico: infiltração, evapo-transpiração, precipitação e runoff. No princípio, os lisímetros foram utilizados para determinar a velocidade e quantidade de água percolada e a partir do século XX os lisímetros foram usados para o diagnóstico da evapo-transpiração. A partir dos anos 50 em diante, os lisímetros passaram a serem empregados de uma maneira mais intensa para estudos micro-meteorológicos sendo utilizados para o desenvolvimento e validação de modelos numéricos e analíticos, para o estudo do leaching, hidro-salinidade e relações água-solo-planta.

5.2 - Concepção geral: balanço hídrico

O fluxo de entrada e saída de água em um lisímetro pode ser expresso pela equação do balanço hídrico:

$$P + I \pm R_o = ET + D \pm \Delta W \quad (5.1)$$

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

P = precipitação e

I = irrigação.

O fluxo de água que sai num tempo determinado é dado por:

ET = evapo-transpiração, que representa a evaporação do solo e a transpiração das plantas;

D = percolação profunda ou água de drenagem;

Ro = percolação superficial, (movimento impedido normalmente pelas bordas salientes do lisímetro) geralmente para lisímetros, Ro = 0;

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

Para determinar a evapo-transpiração (ET) pode ser obtida a partir da equação de balanço hídrico precisam ser medidos de acordo com:

$$ET = P + I - D \pm \Delta W \quad (5.2)$$

A precipitação (P) e a irrigação (I) podem ser diretamente medidas por métodos convencionais com o auxílio de equipamentos como pluviômetros e pluviógrafos. Arranjos especiais devem ser feitos no lisímetro para drenar e medir a água percolada através da massa de solo (D). Uma câmara de drenagem especial e um recipiente calibrado são usados para coletar e medir a água percolada no fundo do lisímetro. A variação do teor de umidade da massa de solo (W), que representa uma acumulação de água no solo após a precipitação ou irrigação, ou uma perda de água do solo por evapo-transpiração, é de determinação mais difícil seja por métodos diretos ou indiretos.

5.3 - Características dos lisímetros

Os lisímetros são classificados segundo sua aplicação como lisímetro com controle de peso ou sem controle de peso (volumétrico).

5.3.1 - lisímetros com controle de peso.

A mudança de peso representa uma medida direta do fluxo de água que entra e sai. Desta forma, o aumento de peso indica entrada de água e a redução do mesmo representa perda de água seja por evapo-transpiração ou por drenagem. A água drenada pode ser recolhida num recipiente periodicamente. Permite-se também uma mediação contínua da evapo-transpiração. No entanto são de elevado custo e necessitam de um sistema de medida altamente sensível e de manuseio complexo. Em função do seu sistema de leitura de dados, são classificados como:

5.3.1.1 - Lisímetros de peso mecânico

São usados vários tipos de balança mecânica para a medição de mudanças de peso devido à evapo-transpiração, precipitação ou irrigação. Podem ser pesadas com uma balança simples portátil, básculas móveis de plataforma e grua. São de alto custo e de construção lenta.

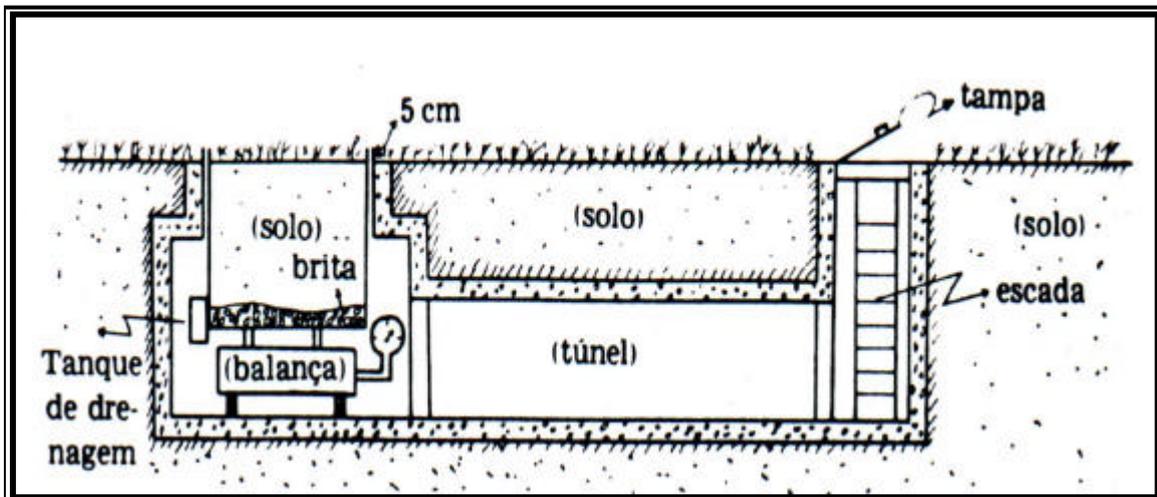


Figura 5.1: - Esquema de um Lisímetro de Pesagem Mecânica (BERNARDO, 1995).

5.3.1.2 - Lisímetro de peso eletrônico

A variação de peso do recipiente com solo é medida eletronicamente por meio de uma célula de resistência mecânica.

5.3.1.3 - Lisímetros hidráulicos

O peso do lisímetro é distribuído sobre células hidráulicas (bolsa, almofada ou colchão de água ou outro líquido) e a pressão resultante é transmitida e indicada num manômetro. Mudanças de altura do manômetro são originadas pelas mudanças de

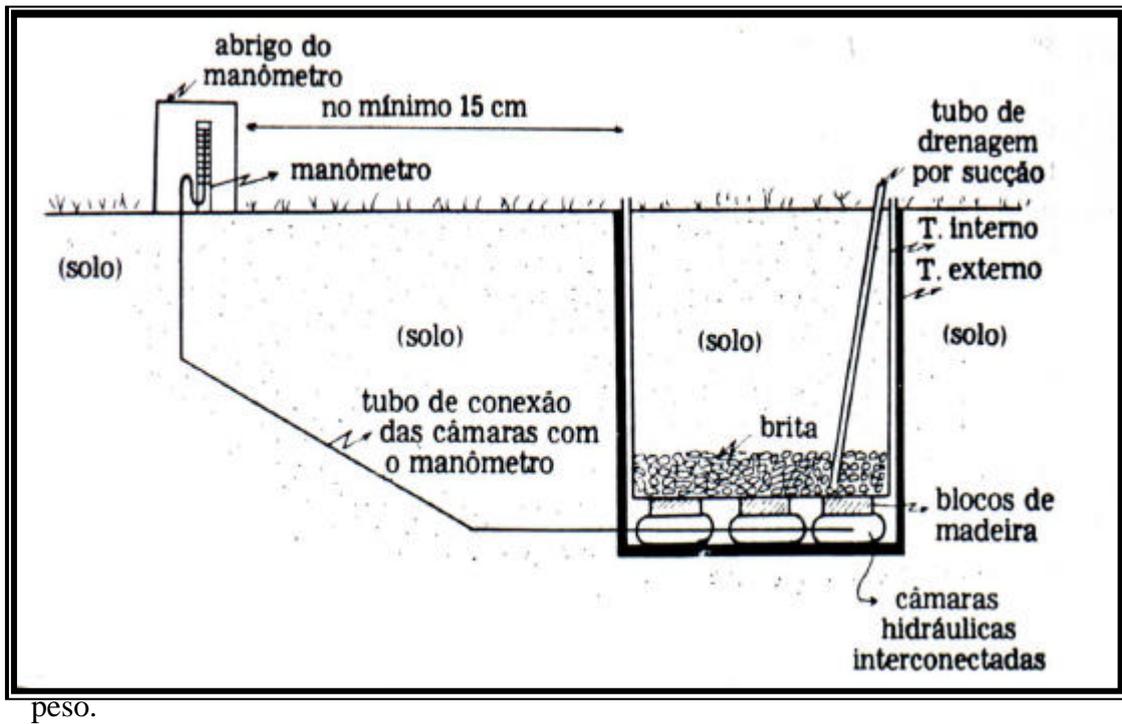


Figura 5.2: - Esquema de um Lisímetro Hidráulico (BERNARDO, 1995).

5.3.1.4 - Lisímetros flutuantes

O recipiente interno flutua sobre um líquido (água ou cloreto de zinco) dentro de um outro recipiente externo (Flutuação hidrostática baseada no princípio de Arquimedes). As variações de peso são obtidas medindo as mudanças de nível do líquido. São menos custosos.

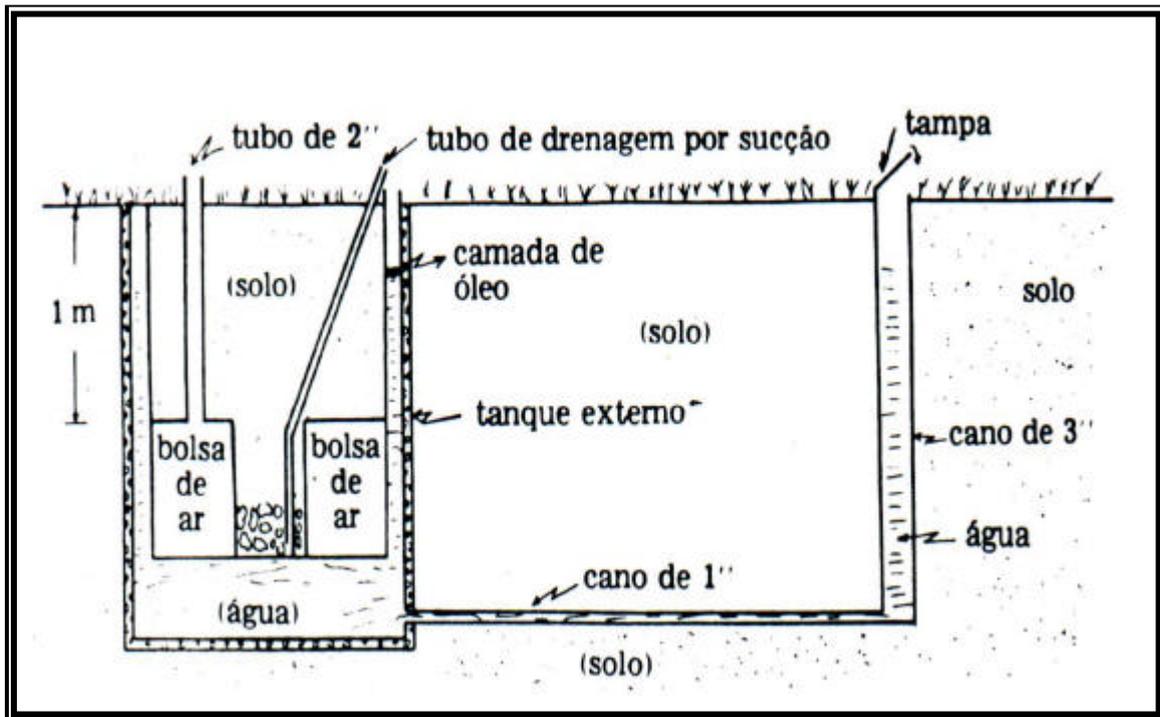


Figura 5.3: - Esquema de um Lisímetro Flutuante (BERNARDO, 1995).

5.3.2 - Os lisímetros volumétricos:

Seu suprimento de água é por chuva natural, irrigação ou sistema de água mantido artificialmente. São classificados como:

5.3.2.1 - Lisímetro de compensação com nível freático constante

O nível freático é mantido constante na sua parte inferior. Em resposta à evapotranspiração, a água do nível freático se move por capilaridade. O rebaixamento do nível freático devido ao movimento de água, é compensado automaticamente por um dispositivo de flutuador e a quantidade de água necessária para repor seu nível, é medida imediatamente. São comuns na Europa e no Oriente-Médio.

5.3.2.2 - Lisímetro de compensação com nível freático na superfície

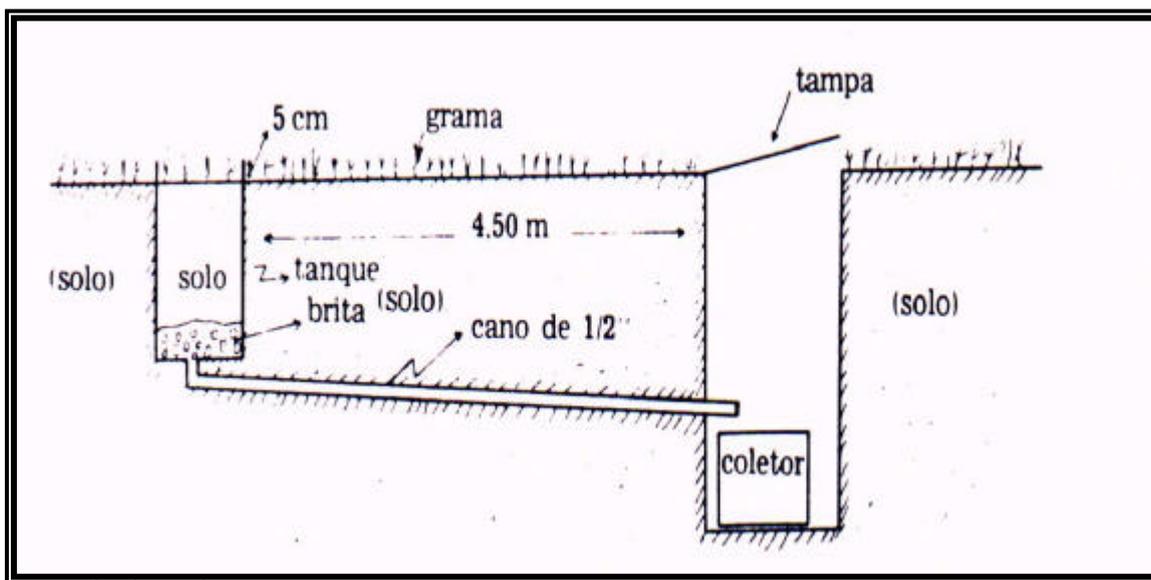
O nível freático é mantido constante acima da superfície do solo, por meio de um dispositivo regulador flutuante, agregando água periodicamente. A evapotranspiração é determinada diretamente medindo a quantidade de água necessária para recuperar a posição original do nível freático.

5.3.2.3 - Tipos especiais de lisímetros de drenagem.

Existem vários outros tipos de lisímetros de drenagem confeccionados especificamente com características especiais como ausência de paredes laterais, falta de fundo, sem parede e sem fundo ou gigantescos.

5.3.2.4 - Lisímetro de Percolação

O dispositivo 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 5.4). No fundo do tanque conecta-se um tubo que transportará a água drenada até um recipiente. O tanque conterá o 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.

Figura 5.4: - Esquema de um Lisímetro de Percolação. (BERNARDO, 1995).

5.3.2.5 - Lisímetro de drenagem sem nível freático

Em geral, são os mais simples e comuns dos lisímetros. A água em excesso é coletada no fundo do lisímetro e seu volume determinado. Por outro lado, a quantidade de água de chuva e irrigação são medidas mediante pluviômetro e / ou um recipiente devidamente calibrado. No solo do lisímetro pode ser mantida uma

umidade, próxima à capacidade de campo saturando-o periodicamente. A evapotranspiração durante um período determinado, é considerada igual à diferença entre a quantidade de água colocada e a drenada.

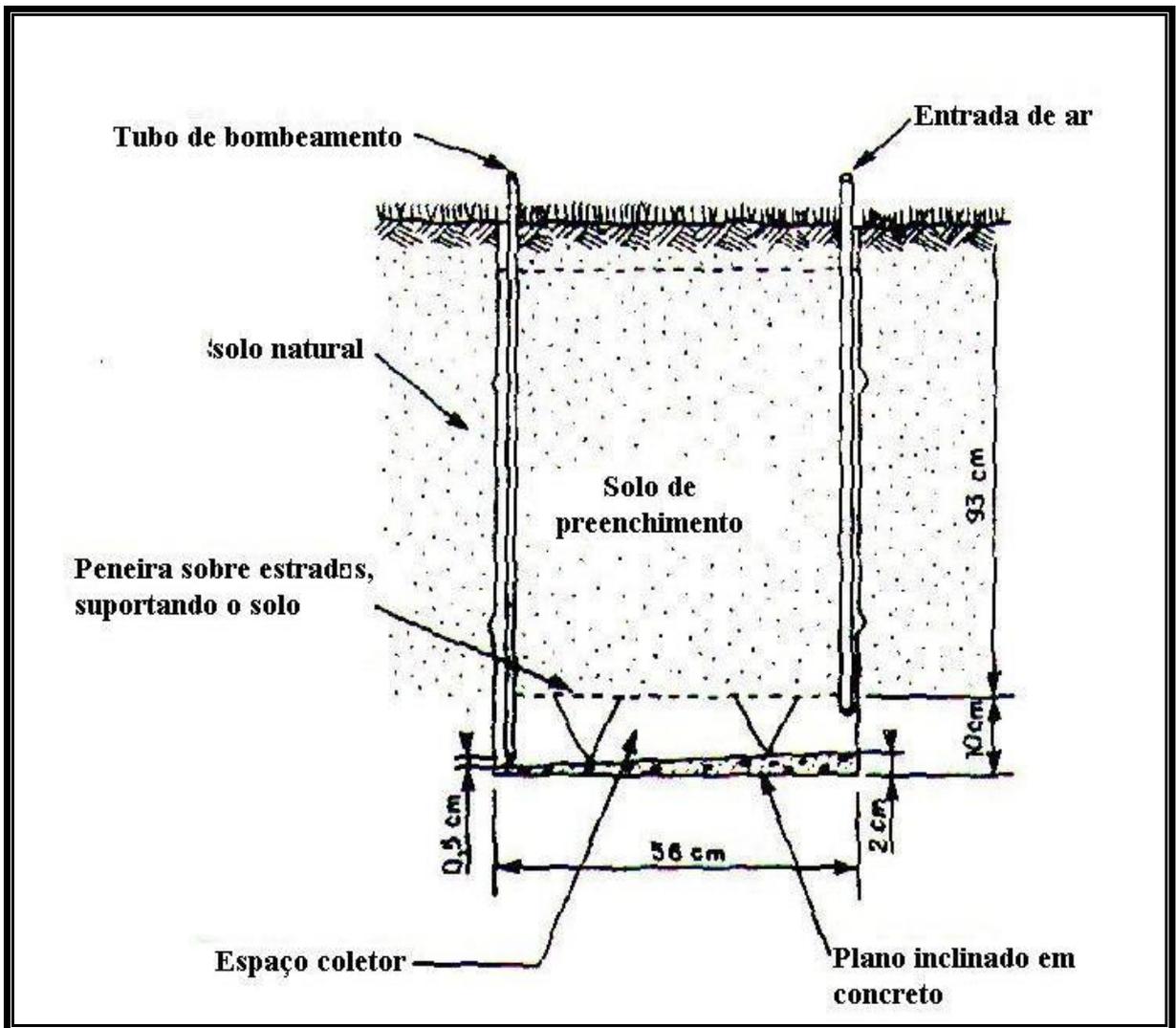


Figura 5.5: - Lisímetro de drenagem simples (Tambor de petróleo) (SLATYER & MCLLROY, 1961)

A simplicidade da construção e da tomada de dados fez com que estes lisímetros fossem utilizados em muitos lugares através do mundo. É recomendado o uso de áreas mínimas de 2 a 4 m². No entanto, unidades de menores superfícies são freqüentemente utilizadas, mas o efeito de margem e de escala restringe bastante o uso dos resultados. Outras limitações destes lisímetros são:

1. A inexatidão que se obtém devido às variações de retenção de água pelo solo. A quantidade de água no solo do lisímetro próxima à

capacidade de campo, não é necessariamente a mesma depois de varias ocorrências sucessivas de drenagem. Ao mesmo tempo, a saturação muito freqüente, necessária para evitar estas diferencias na capacidade de campo, pode resultar num regime de água no lisímetro, completamente diferente ao da área de bordo.

2. A demora: o tempo da água de percolação em percorrer o perfil de solo, especialmente em solo argiloso, pode demorar vários dias.

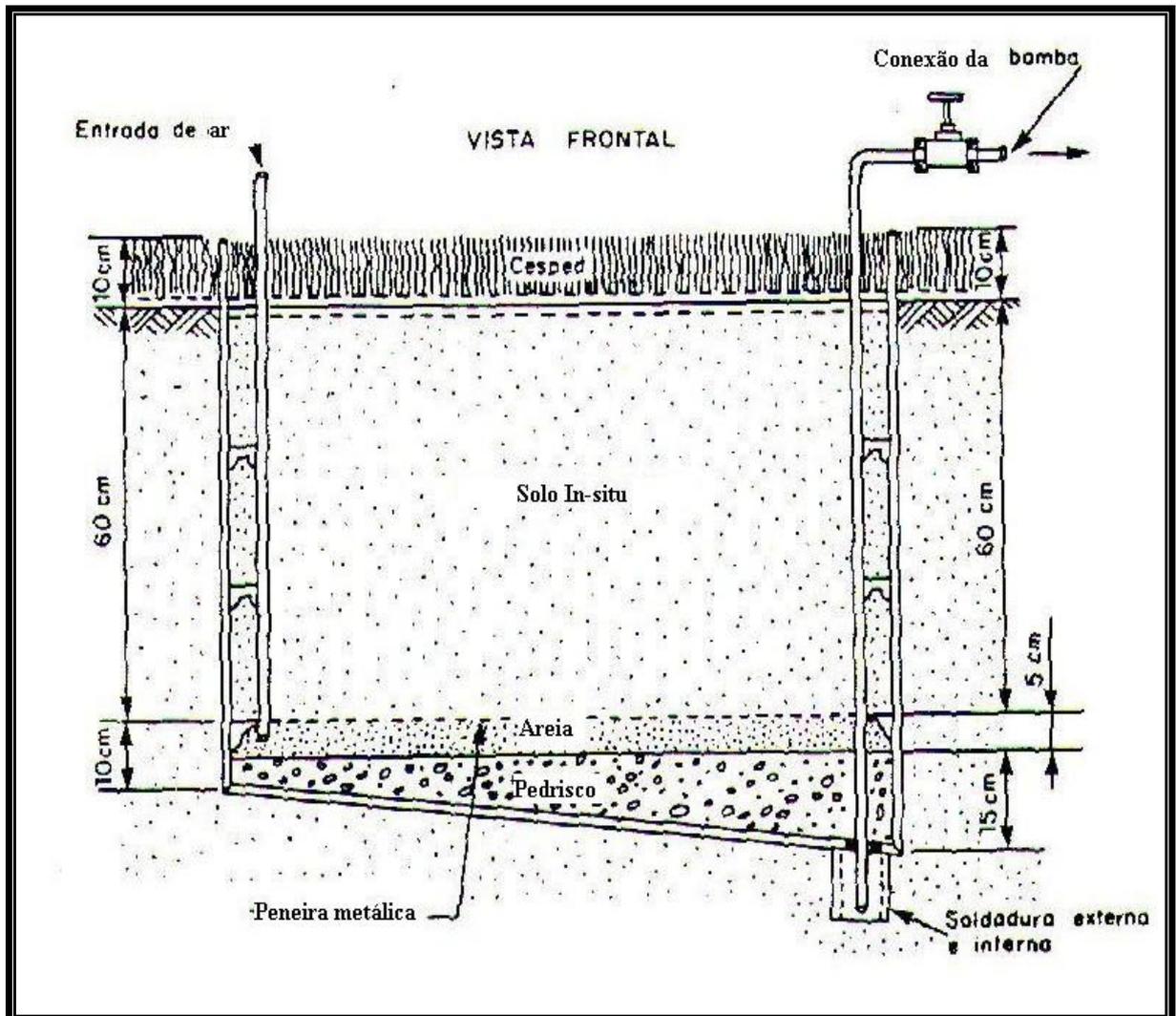


Figura 5.6: - Evapotranspirômetro tipo Thornthwaite (UNDP / WMO 1974)

As limitações anteriores implicam que com estes lisímetros a evapo-transpiração pode ser determinada unicamente para períodos relativamente grandes de semanas a meses. A figura 5.5 (SLATER & MCILROY, 1961) mostra esquematicamente as características básicas do layout do lisímetro, sendo que lisímetros menores como o descrito por MATHER (1964) que tem dimensões de 0,25m² de área e 47cm de

profundidade já foram utilizados.

O lisímetro de Thornthwaite foi também usado para determinar evapotranspiração, tendo dimensões de 1m x 1m de superfície e com os lados opostos de 80 e 90 cm de profundidade permitindo um fundo em declive a assim facilitar a extração de água drenada (Figura 5.6). Um sistema de bombeamento é colocado para retirar o excesso de água drenado.

CAPITULO 6: - ESTUDOS DE LABORATORIO

Este trabalho trata do estudo dos solos não-saturados, direcionado para a pesquisa do funcionamento dos tensiômetros de sucção elevada, dando continuidade às pesquisas de tese defendidas por MENDES (2000) e PACHECO (2001) no Programa de Engenharia Civil da COPPE-UFRJ, e para uma melhor compreensão da influência da ventilação (drenagem do ar e da água) do solo no comportamento da sucção relacionada ao avanço da frente de umidade. Propuseram-se assim novos tensiômetros de sucção elevada, cujos elementos constitutivos “sofrem” variações segundo cada caso. Ao mesmo tempo, conceberam-se dois mini-lisímetros que servirem de meio para ensaiar os solos no domínio não-saturado, com características e concepções diferenciadas. Portanto, pode-se dividir o trabalho em três partes:

- A primeira parte trata do desenvolvimento dos novos tensiômetros de sucção elevada e a variação dos seus componentes para efeito de comparação entre os mesmos.
- A segunda parte desenvolve a aplicação destes últimos, em conjunto com outros instrumentos de mensuração de tensão de sucção, umidade e temperatura, como instrumentos medidores de sucção comparados aos outros equipamentos instalados.
- A terceira parte apresenta a concepção dos lisímetros e análise do seu desempenho; e a instalação, caracterização dos solos ensaiados e seus comportamentos nas condições particulares definidas.

6.1 - Os novos tensiômetros de sucção elevada

Em 1993, RIDLEY e BURLAND apresentaram resultados de estudos com um tensiômetro de alta sucção. Desde então vários modelos já foram desenvolvidos por diversos autores em diferentes países. PACHECO (2001) apresentou um protótipo de tensiômetro, bastante simples e econômico. O seu baixo custo, associado à simplicidade de preparo e montagem, representa um avanço considerável, pois permite sua concepção em grande escala e uma maior variabilidade de seus componentes.

O princípio dos tensiômetros utilizados é baseado num sistema que emprega um reservatório mínimo de volume de água deaerada; um corpo com superfície altamente lisa que, neste atual caso, é composto por um material acrílico, um transdutor de pressão e uma pedra porosa de alta pressão de borbulhamento.

6.1.1 – Os componentes:

6.1.1.1 - O transdutor de pressão:

O transdutor é um equipamento que transforma uma energia em outra através de uma relação conhecida. Mede-se a pressão por meio de um transdutor transformando esta numa tensão elétrica proporcional à mesma. O transdutor produz um sinal elétrico de saída proporcional à grandeza sendo medida. O sensor compreende as partes sensíveis do instrumento, que neste caso, é um diafragma capacitivo.

O princípio básico de funcionamento dos transdutores de pressão é baseado num diafragma que se distende de acordo com a pressão do líquido ou gás atuando em um dos seus lados, fechado em um compartimento estanque; do outro lado desse compartimento, em contato com a pressão atmosférica, encontram-se os extensores ou “strain-gauge” que medem o movimento do diafragma, o qual, por sua vez, é proporcional à pressão (WERNECK, 1996).

6.1.1.2 - O Elemento poroso

São empregadas pedras porosas de alta pressão de borbulhamento, de 5 e 15bar, com diâmetros e espessuras variados. São pedras da SoilMoiture® e apresentam aspectos específicos garantidos pelo fabricante.

Com a rigorosa seleção do tamanho dos poros, as pedras porosas de alta precisão podem encontrar o mais exigente diferencial de pressão ou valores de sucção sem sofrerem perdas e danos. Cada lote de pedra produzida assim como várias pedras unitariamente produzidas são individualmente testadas no que se refere a suas propriedades hidráulicas e pressão de borbulhamento. As pedras usadas são de estrutura porosa aberta como mostrado na Figura 3.8-2.

A Tabela 6.2 apresenta as diferentes pedras utilizadas na montagem dos tensiômetros novos, assim como os diferentes tipos de pedra produzidos pelo fabricante. A diferença de pressão garante a variação do fluxo que passa em cada pedra como mostrado na Tabela 6.2 e conseqüentemente a velocidade do fluxo que regula o tempo de resposta de cada equipamento nele acoplada. O efeito do diâmetro e da espessura será medido e analisado nos dados coletados pelos tensiômetros ensaiados. As pedras são montadas na cápsula acrílica usando uma cola da marca Araldite. É uma cola que resiste a altas pressões e a temperaturas inferiores a 70°C. Uma fina película do adesivo

é aplicada na lateral da pedra e esta introduzida na cápsula ate a sua secagem total em torno de 20 minutos.

Tabela 6.1: - Especificação técnica das pedras porosas utilizadas fornecidas pelo fabricante (SOIL MOISTURE[®]).

VALOR DE ENTRADA DE AR (BAR)	PRESSAO DE BORBULHA MENTO (PSI)	POROSIDADE APROXIMADA (%vol.)	CONDUTIVIDADE HIDRAULICA SATURADA (Cm/s)	MÁXIMO TAMANHO DE POROS (µm)	ESCOAMENTO DIRETO "1/4-INCH PLATE" (ml/hr/cm2/1 4.7 psi)
0,5 BAR (-B0.5M2)* "HIGH FLOW"	7 A 9	50%	$3,11 \times 10^{-5}$	6	180
1 BAR (-B01M3)* "HIGH FLOW"	19 A 28	45%	$8,6 \times 10^{-6}$	2,5	50
1 BAR (-B01M1)* "STANDARD FLOW"	20 A 30	34%	$7,56 \times 10^{-7}$	1,7	5
2 BAR (-B02M1)* "STANDARD FLOW"	38 A 45	32%	$6,30 \times 10^{-7}$	1,1	4,2
2 BAR (-B02M2)* "HIGH FLOW"	32 A 42	38%	$6,93 \times 10^{-7}$	1,3	4,6
3 BAR (-B03M1)* "STANDARD FLOW"	46 A 70	34%	$2,50 \times 10^{-7}$	0,7	1,6

RD FLOW"					
5 BAR (-B05M1)* "STANDA RD FLOW"	80	31%	$1,21 \times 10^{-7}$	0,5	0,7
15 BAR (-B15M1)* "STANDA RD FLOW"	220	32%	$2,59 \times 10^{-9}$	0,16	0,015
(*) - PARTE DO NÚMERO SUFIXO CORRESPONDENDO AO APROPRIADO VALOR DE ENTRADA DE AR					

Tabela 6.2: - Dimensões das pedras porosas utilizadas

TENSIÔMETROS	TENSE-EPX.1		TENSE-ASH.1		TENSE-EPXO.1		TENSE-ASH.2	
	DIAM.(mm)	ESP.(m m)	DIAM.	ESP.	DIAM.	ESP.	DIAM.	ESP.
PEDRAS	Ensaio		Ensaio		Ensaio		ensaio	
DIAM/ESP (mm)	15,85	7,55	15,6	7,05	29	7,20	29	7,20
PRESSAO (bar)	15		15		5		5	

6.1.1.3 - O corpo acrílico:

Desenvolve a função de matriz de tudo o conjunto do equipamento. As suas paredes têm a função de proteger o transdutor nele fixado por filete de rosca na sua câmara interna superior; sua base recebe a pedra porosa e uma câmara que fica na

interface entre a membrana do transdutor e a face interna da pedra porosa e serve de reservatório de água. Ele deve ser robusto e resistir a eventuais impactos. Os corpos construídos apresentam reservatórios de tamanhos diferentes. O aspecto principal da câmara é a necessidade de estar com paredes bastantes lisos a fim de minimizar uma possível fixação de bolhas de ar. É de fácil concepção, resistente, de baixo peso e custo.

No princípio do trabalho buscou-se montar sete novos tensiômetros com diferentes modelos e tipos de transdutores. Dos sete tensiômetros montados, somente quatro foram reaproveitados pelo fato que os outros três não tiveram um bom desempenho por motivos que trataremos em anexo.

6.1.2 - Os diferentes modelos de tensiômetros

Os quatro tensiômetros foram diferenciados através de uma codificação para uma melhor identificação, tomando em consideração seus componentes como a pedra porosa, as dimensões do reservatório de água e aplicando como principal diferencial o modelo de transdutor usado. Os tensiômetros novos de sucção elevada (TEN.S.E.) são os seguintes:

6.1.2.1 - O tensiômetro TENSE-ASH. 1:

É equipado de um transdutor modelo Ashcroft®, similar à serie utilizada por Pacheco, 2001 cujas características seguem adiante:

O modelo de transdutor da **Ashcroft®** (serie K2) foi escolhido pela sua alta disponibilidade no mercado e por ter o seu uso difundido no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ em vários experimentos.

Desta forma a serie K2 (**ASHCROFT, 1999**) apresenta o uso de uma película fina de polysilicon, com ligações moleculares simples e estáveis, caracterizando um diafragma e uma ponte de tensão, não existindo nenhuma cola ou agente de ligação a contribuir à instabilidade ou à tração do sinal. Os resistores da tensão do polysilicon combinam níveis de ruído muito baixo, com a saída muita elevada do sinal. A ponte

integral do diafragma e do polysilicon do metal é virtualmente não afetada por choque, pela vibração ou pela montagem. Estes transdutores são oferecidos em muitas escalas padrão da pressão com o sinal de saída de alta qualidade (Pacheco, 2001). A sua montagem é bastante simples. A sua fonte elétrica é em corrente contínua e, no caso do modelo K2, está entre 5 mV/V a 10 mV/V. A faixa de pressões fica entre 0 e 2000psi (± 13800 Kpa) com precisão de 0,5%. Os dados complementares encontram-se em anexo.



Figura 6.1: - Transdutor de Pressão Modelo K2 (ASHCROFT, 1999).

(PACHECO, 2001).

A pedra porosa instalada é uma pedra de 15bar com uma condutividade hidráulica testada de $2,59 \times 10^{-9}$ cm/s conforme tabela do fabricante. As suas dimensões são de 7,05 mm de espessura por 15,6 mm de diâmetro. A pedra foi colada na cápsula acrílica por uma cola da marca Araldite, aplicada cuidadosamente nas suas face lateral, evitando excesso, que poderiam colmatar os poros.

A dimensão do seu reservatório de água é de 6,9 mm de diâmetro e 33,7 de profundidade, totalizando um volume de 1259,50 cl. Ela segue uma aproximação do reservatório do protótipo apresentado por PACHECO (2001)

6.1.2.2 – O tensiômetro TENSE-ASH 2:

Utilizou-se o mesmo modelo e serie de transdutor que o do tensiômetro TENSE-ASH1. A pedra porosa utilizada é de 5 bar com uma condutividade hidráulica saturada de $1,21 \times 10^{-7}$ cm/s e com dimensões de 29 mm de diâmetro por 7,2 mm de espessura. O

seu reservatório de água é de 5,5 mm de diâmetro e 44 mm de profundidade, tendo um volume de 1044,84cl.

6.1.2.3 - O Tensiômetro TENSE-EPX 1:



Figura 6.2 : - O tensiômetro TENSE EPX 1 montado.

É equipado de um transdutor modelo Entran® de serie EPX-V01-5KP. Este tipo de sensor foi utilizado por RIDLEY (1993) como componente dos seus tensiômetros de sucção elevada. É um sensor miniatura em aço inoxidável à membrana nivelada (à superfície), soldada, ideal para medidas estáticas e dinâmicas quando necessitamos de pequenas dimensões. È equipado de uma rosca M5 ou 10-32UNF e de uma junta incorporada. Pode ser usado em água ou fluido corrosivo.



Figura 6.3: Transdutor de pressão modelo EPX da ENTRAN®.

A fonte de alimentação é uma corrente contínua de 10 volts. As suas resistências respectivas de entrada e saída são de 1320 Ω e 326 Ω , respectivamente. Ele tem uma sensibilidade de 120,04 mV/FS variando da ordem de $\pm 2\%$ a 50°C; com o FO de 39932 e o seu domínio de utilização é na faixa de -40°C a 120°C . Este tipo de transdutor tem um desequilíbrio inicial de ± 10 mV e sua pressão de referência é relativa. O domínio de funcionamento é de ordem de **5000psi** ou 34,5Mpa, podendo resistir até 6000psi. Outros dados complementares do equipamento encontram-se em anexo.

A pedra porosa utilizada é da Soilmoisture® de 15bar, e suas dimensões são de 15,85mm de diâmetro e 7,55mm de espessura. O reservatório de água (o espaço vazio entre a membrana e a face interna da pedra porosa) é de 4,4mm de diâmetro por 0,35mm de profundidade tendo um volume total de 5,32cl.

6.1.2.4 - O Tensiômetro TENSE-EPXO 1:

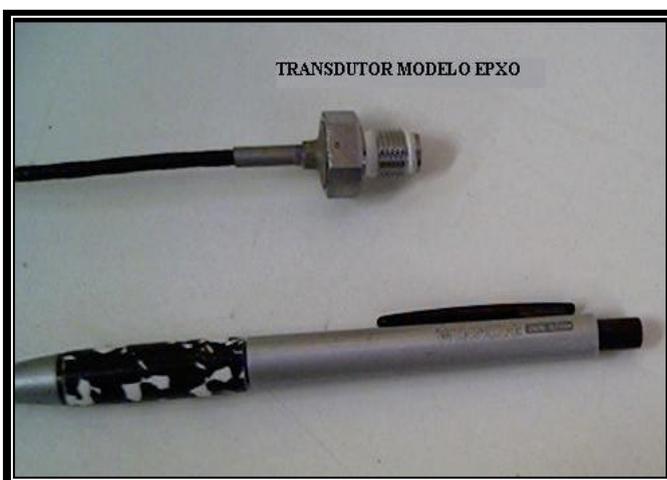


Figura 6.4 : - Transdutor de pressão modelo EPXO da ENTRAN.

O modelo EPXO:

É equipado de um transdutor de alta performance concebido para medida de alta pressão e para aplicações que necessitam pequenas compensações. São de aço inoxidável e com membrana soldada e nivelada à superfície. O modelo tipo é da serie EPXO-X01-3KP. A sua alimentação é em corrente continua de 5volts. As suas resistências de entrada e saída são de 1k Ω . Ele tem uma sensibilidade de 10,454 mV/FS variando da ordem de $\pm 1\%$ a 50°C; com o FO de 24587 e o seu domínio de utilização é na faixa de -40°C a 125°C. O domínio de funcionamento é de ordem de **3000psi** ou 20,7Mpa, podendo resistir até 4500psi. Este tipo de transdutor tem um desequilíbrio inicial de $\pm 5\%$ FSO e sua pressão de referencia é relativa. Outros dados complementares do equipamento encontram-se em anexo.

Uma pedra porosa de 5bar da Soilmoiture® foi utilizado com dimensões de 29mm de diâmetro e 7,20mm de espessura. O reservatório de água deaerada tem dimensões de 9mm de diâmetro e 0,2mm de profundidade tendo um volume de 12,72cl.

Tabela 6.3: Dimensões dos reservatórios dos Tensiômetros.

TENSIOMETRO S	TENSE- EPX.1		TENSE- ASH.1		TENSE- EPXO.1		TENSE- ASH.2	
Reservatórios	DIAM. (mm)	PROF. (mm)	DIAM. (mm)	PROF. (mm)	DIAM. (mm)	PROF. (mm)	DIAM. (mm)	PROF. (mm)
	4,4	0,35	6,9	33,7	9	0,2	5,5	44
Volume (mm ³)	5,32		1259,50		12,72		1044,84	

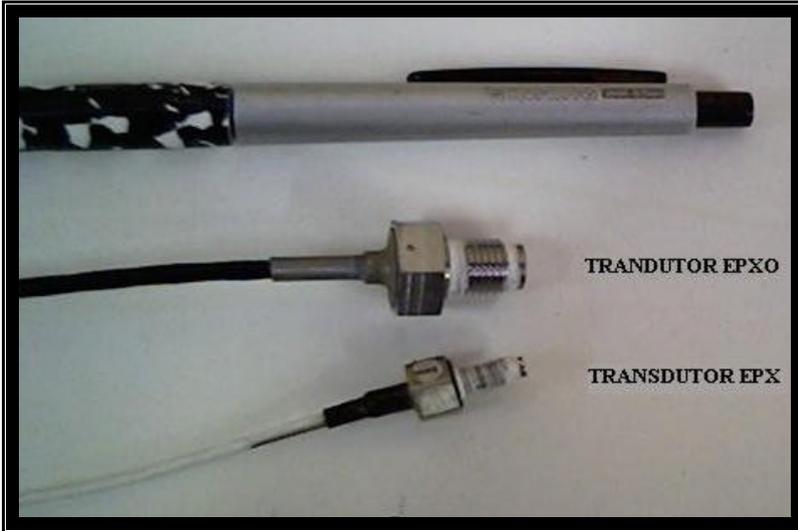
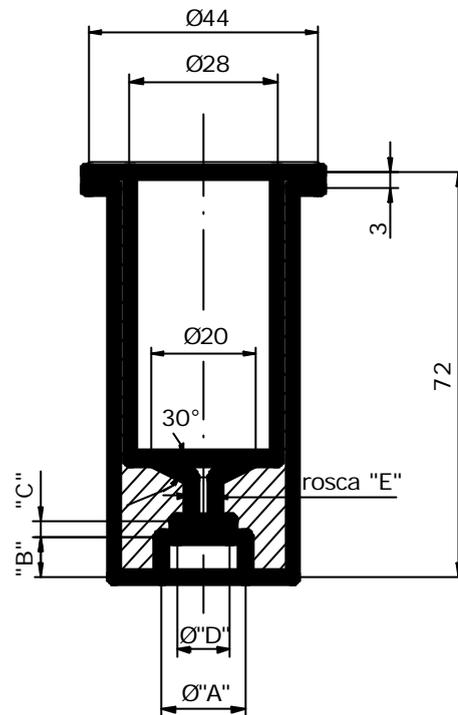


Figura 6.5:- Os transdutores de pressão EPXO e EPX da ENTRAN.



PEÇA	Ø"A" x "B"	Ø"D" x "C"	ROSCA "E"
EPX 1	15.85 X 7.55	4.40 X 0.35	3/8" x 24fpp
ASH 1	15.60 X 7.05	6.90 X 3.00	NPT 1/4"
EPXO 1	29.00 X 7.20	9.00 X 0.20	M5 x 0.8
ASH 2	29.00 X 7.20	5.50 X 3.00	NPT 1/4"

(dimensões em mm)

CROQUIS DA CÁPSULA ACRÍLICA DOS TENSIOÛMETROS
(sem escala)

Figura 6.6: Protótipo da cápsula acrílica com suas diferentes dimensões.

•Processo de saturação das pedras porosas:

Inicialmente deve-se saturar as pedras porosas, o que é realizado após sua montagem nos respectivos corpos de acrílico. O processo de saturação aplicado é idêntico àquele executado por Pacheco (2001) e desenvolvido por BEZZERA (1996). Os equipamentos e elementos necessários para execução desta operação são:

1. A câmara de saturação do piezocone
2. A bomba de vácuo
3. O sistema de aplicação de pressão (Triaxial)
4. Água destilada e deaerada
5. Câmara de calibração/saturação.
6. Cápsula acrílica com a pedra porosa já colada

As seguintes etapas foram desenvolvidas:

- ❖ Ferver a água destilada durante um período superior a 15 minutos e resfriar a mesma depois.
- ❖ Colocar o corpo acrílico, com a pedra preliminarmente nele colada, na câmara de saturação do piezocone com a base (face externa da pedra porosa) em contacto com o fundo da câmara e vedar a câmara, imobilizando a cápsula afim que ela não vire dentro da mesma.
- ❖ Preencher a câmara com água deaerada até um pouco mais da metade, evitando que esta preencha totalmente a cápsula acrílica, (esta terá somente pouca água em seu interior).
- ❖ Conectar a câmara à bomba de vácuo e aplicar o processo durante mais de 15 horas.

Após este tempo constatou-se que o volume de água no interior da cápsula aumenta, pois o ar presente na pedra foi substituído por água deaerada e o processo de

vácuo tende em aspirar cada vez mais água para dentro da cápsula acrílica, gerando assim um fluxo, pois a mesma não estava ao mesmo nível que a água da câmara.

❖ Retirar a cápsula da câmara tomando o cuidado de executar este processo dentre d'água para minimizar a possibilidade de dessaturação da pedra.



Figura 6.7-1: Câmara de calibração / saturação. Figura 6.7-2: Câmara de saturação da pedra porosa

O processo de saturação, a partir deste momento entra na sua segunda fase executada com o auxílio de uma outra câmara que foi exclusivamente desenvolvida para fins de saturação e calibração dos tensiômetros. Os seguintes passos devem ser seguidos rigorosamente:

- Preencher a câmara de saturação/calibração com água deaerada após a montagem e travamento prévio nela da cápsula.
- Conectar a câmara ao sistema de aplicação de cargas (triaxial) e vedar as outras saídas.
- Aplicar altas pressões de em ciclos de carga e descarga durante 10 minutos. Este processo nos indica inicialmente sobre a permeabilidade da pedra e a sua boa drenagem, pois pode-se visualizar o efeito da fácil ou difícil passagem da água pela pedra.

➤ Após este processo, montar o transdutor na cápsula tomando a precaução de garantir a ausência de bolhas de ar; por isto executa-se esse processo introduzindo a câmara dentro de uma balde com água deaerada.

➤ Retirar metade da água que está na câmara de calibração/saturação e vedar a entrada de água.

➤ Conectar a câmara na bomba de vácuo e aplicar o vácuo durante 3 horas; durante este processo verifica-se se aparecem eventuais bolhas de ar dentro do reservatório do tensiômetros, isto é na câmara entre a pedra e o transdutor.

Caso haja presença de ar, deve-se retirar e reinstalar o transdutor cuidando mais da vedação; caso contrário, prosseguir para a etapa final.

➤ Completar a água da câmara de calibração/saturação e esta estará pronta para a calibração do tensiômetro.

Repete-se este roteiro para todos os tensiômetros.

○ **Processo de calibração.**

A calibração dos tensiômetros seguiu o mesmo processo executado por PACHECO (2001), isto é, aplicando se pressões positivas nos tensiômetros e lendo a deformação provocada na sua membrana em milivolt. Na fase da calibração, os equipamentos participativos são, no caso dos tensiômetros com transdutores da Entran:

1. O tensiômetro acoplado à câmara de calibração/saturação
2. O sistema de aplicação de pressão (triaxial)
3. Dois milivoltímetros de 4 dígitos
4. Um amplificador de sinal e sua fonte
5. Uma fonte para alimentação do transdutor
6. Um estabilizador de tensão.

O seguinte esquema foi então montado conforma a Figura 6.8.

Para cada tensiômetro, aplicou-se então varias pressões, progressivamente, em ciclos de carga e descarga, conforme a Tabela 6.4. As pressões foram aplicadas usando-

se um sistema de carga de coluna de água. Lê-se a deformação provocada pela carga aplicada em milivolt no voltímetro. O uso de um amplificador de sinal foi necessário pelo fato que os sinais emitidos pelos transdutores da Entran® eram muito fracos e a unidade de leitura (o milivoltímetro) não conseguia ler os dados. No caso dos tensiômetros com transdutores Ashcroft®, não se necessitou usar o amplificador de sinal, pois estes tipos já vêm com um sistema de amplificação própria acoplada.

Cada tensiômetro foi calibrado conforme seu próprio sistema; isto é, repetiu-se o processo desde a saturação ate a aplicação final das cargas e leitura de dados.

Finalizado a calibração, transportaram-se os equipamentos para sua instalação nos diferentes mini-lisímetros.

Tabela 6.4: - Calibração dos tensiômetros de alta sucção

		Leituras em volt							
Tensiômetro	Pressão (kPa)	1° Ciclo		2° Ciclo		3° Ciclo		Médias	
		carg.	descarg.	carg.	descarg.	carg.	descarg.	carg.	descarg.
TENSE EPX-1 15BAR	0	0,32	0,31	0,31	0,31	0,31	0,30	0,31	0,31
	51	0,46	0,46	0,46	0,46	0,45	0,45	0,46	0,45
	156	0,76	0,77	0,76	0,76	0,76	0,75	0,76	0,76
	251	1,05	1,05	1,04	1,05	1,04	1,04	1,04	1,04
	367	1,33	1,33	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32
	674	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29	2,29
TENSE ASH 2 5 BAR	0	11,77	11,32	11,32	11,38	11,67	11,8	11,59	11,50
	87	13,64	14,54	14,55	14,68	14,35	14,54	14,18	14,59
	266	21,54	23,84	22,46	22,4	22,46	22,55	22,15	22,93
	352	26,2	26,36	25,98	26,25	26,15	26,22	26,11	26,28
	404	28,38	28,55	28,48	28,65	28,59	28,66	28,48	28,62
	687	40,89	40,89	40,79	40,79	40,61	40,61	40,76	40,76
TENSE EPXO-1 5BAR	0	0,95	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,98
	50	1	1,02	1,02	1,02	1,01	1,02	1,01	1,02
	150	1,09	1,1	1,1	1,1	1,08	1,1	1,09	1,10
	276	1,2	1,2	1,2	1,2	1,19	1,2	1,20	1,20

	366	1,27	1,27	1,277	1,278	1,27	1,27	1,27	1,27
	406	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,30	1,30
TENSE ASH 1 15 BAR	0	13	13,6	13,6	13,6	13,6	13,8	13,40	13,67
	85	14	16	14,1	16,1	14,3	17	14,13	16,37
	271	25,7	26,4	25,8	26,2	25,8	26,5	25,77	26,37
	357	31,1	31,4	31	31,2	31,2	31,3	31,10	31,30
	412	34,4	34,7	34,4	34,6	34,3	34,2	34,37	34,50
	688	51,8	51,8	51,8	51,8	51,8	51,8	51,80	51,80

As Figuras apresentadas a seguir representam as curvas plotadas para a calibração dos tensiômetros e as extrapolações para a parte negativa.

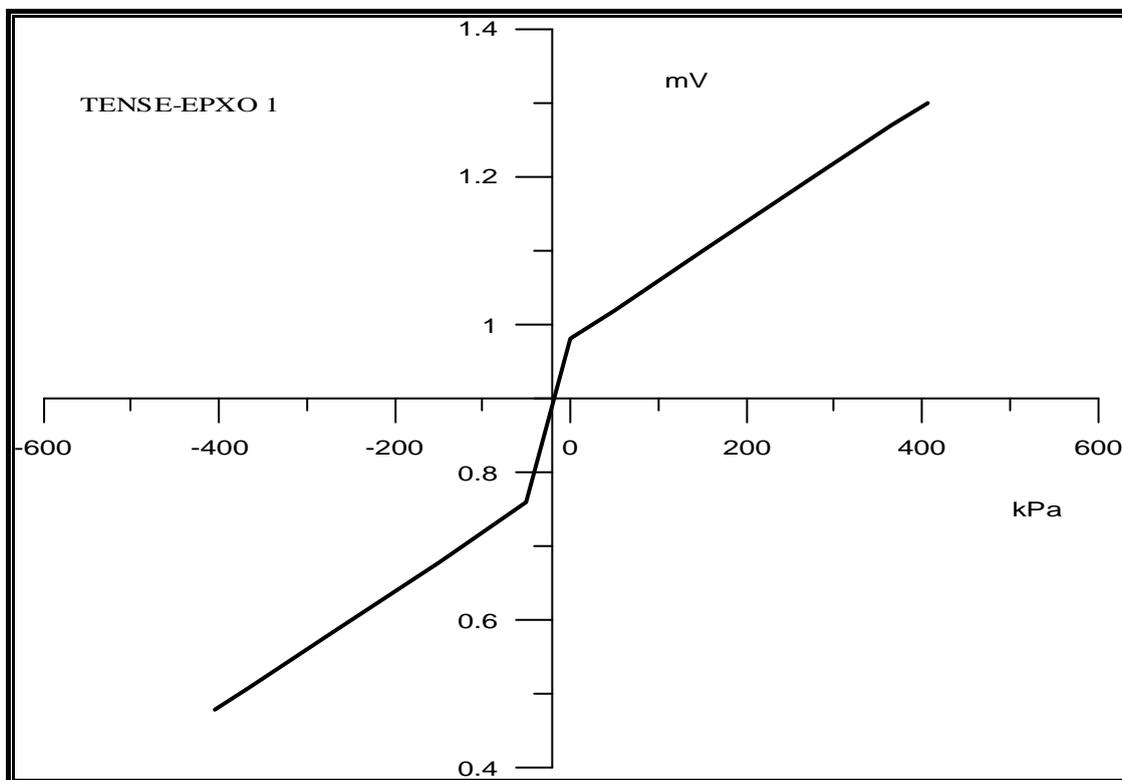


Figura 6.8-1: - Curva de calibração do tensiômetro TENSE-EPXO 1.

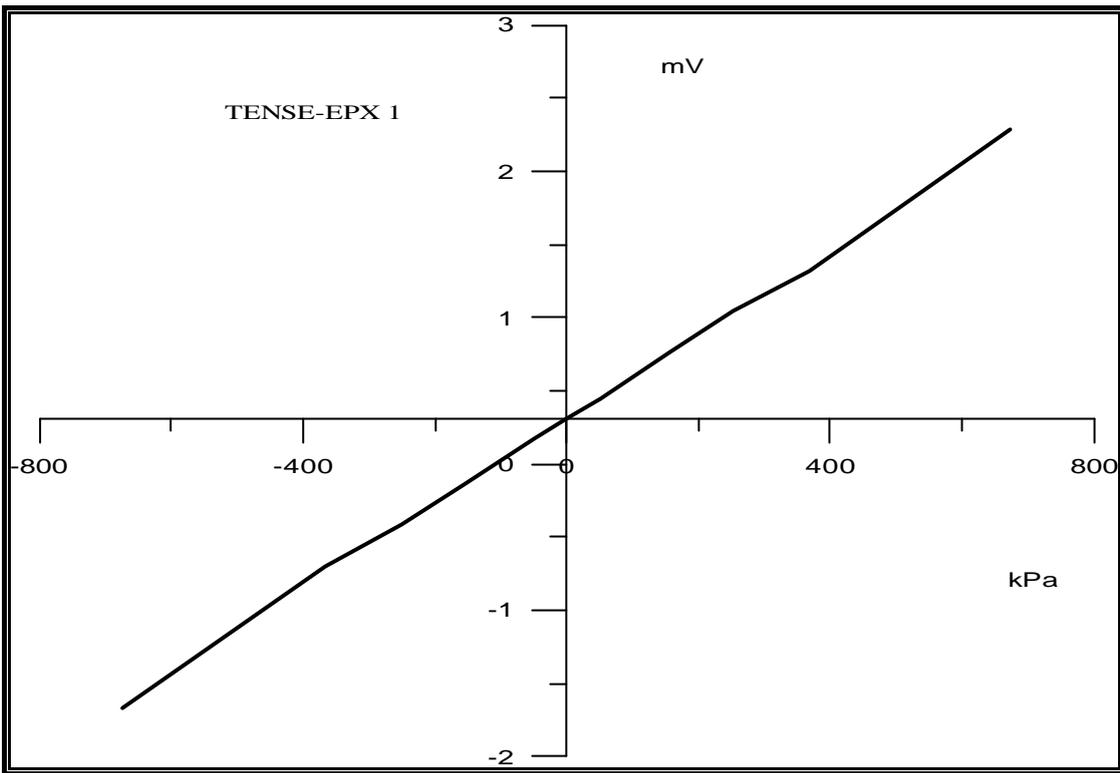


Figura 6.8-2: - Curva de calibração do tensiômetro TENSE-EPX 1.

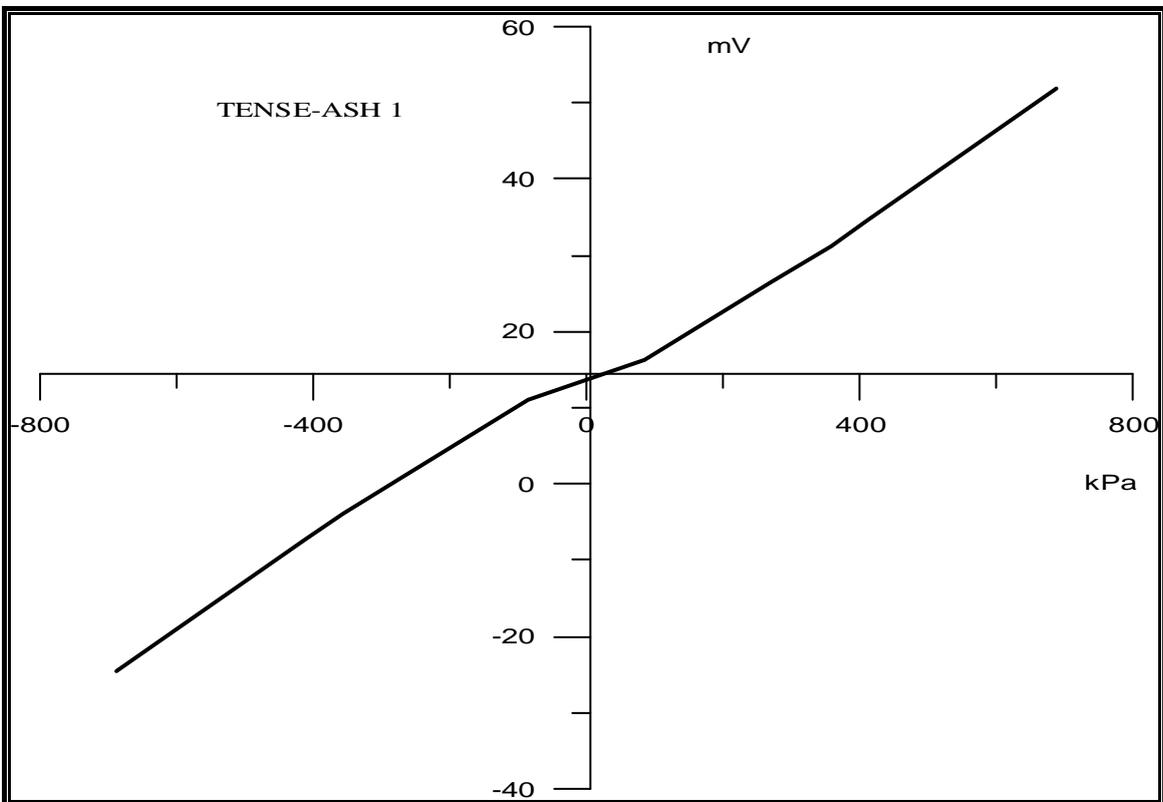


Figura 6.8-3: - Curva de calibração do tensiômetro TENSE-ASH 1.

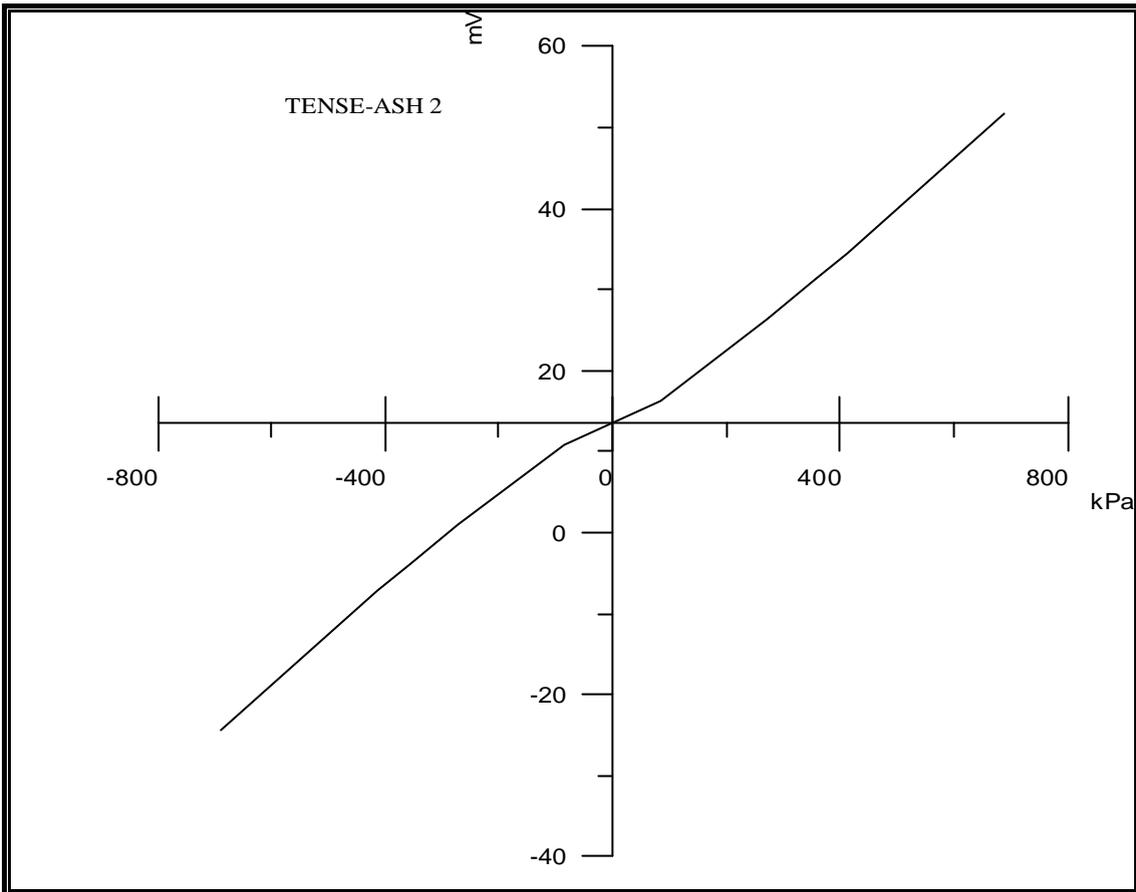


Figura 6.8-4: - Curva de calibração do tensiômetro TENSE-ASH2

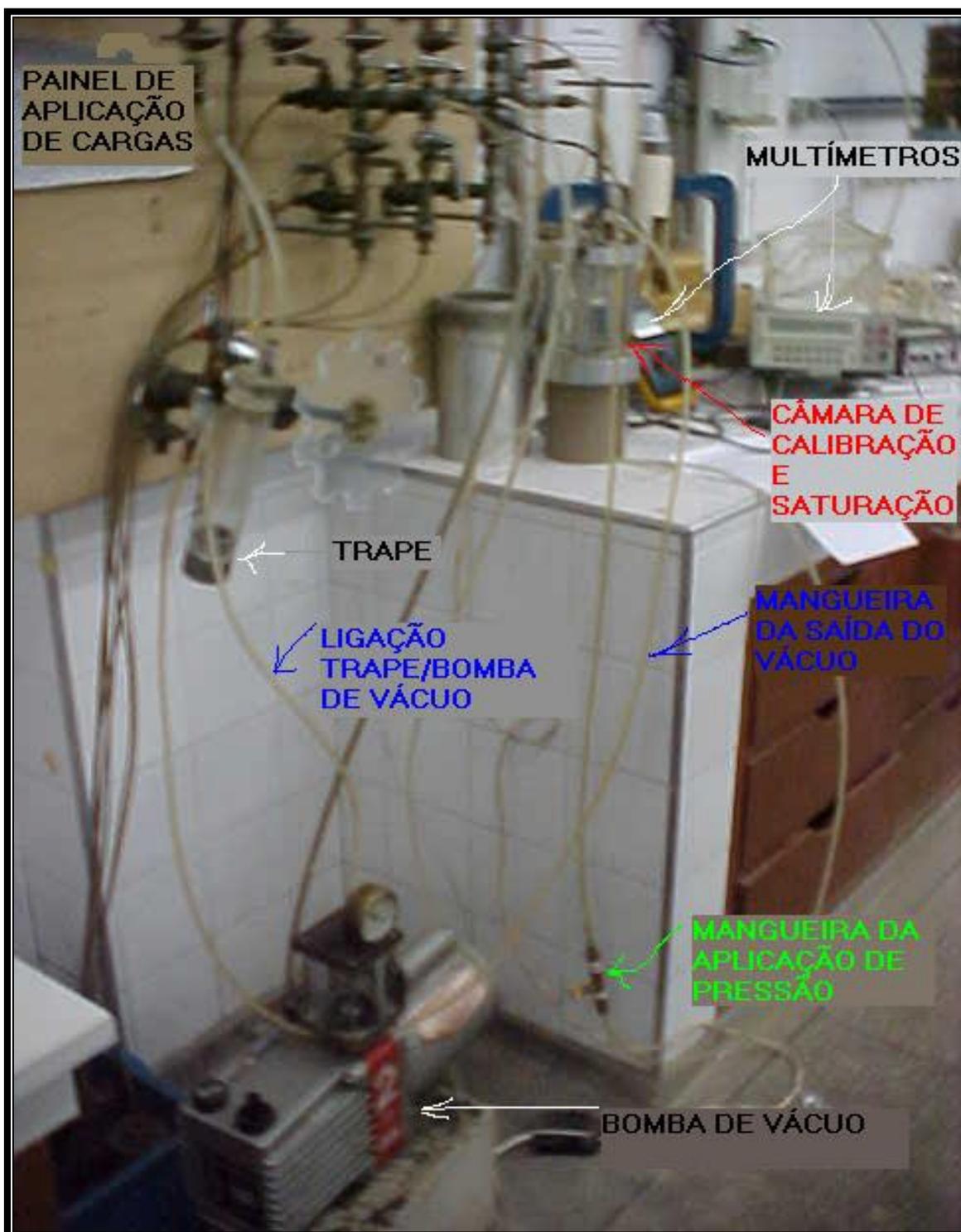


Figura 6.9: - Sistema do dispositivo de saturação-calibração.

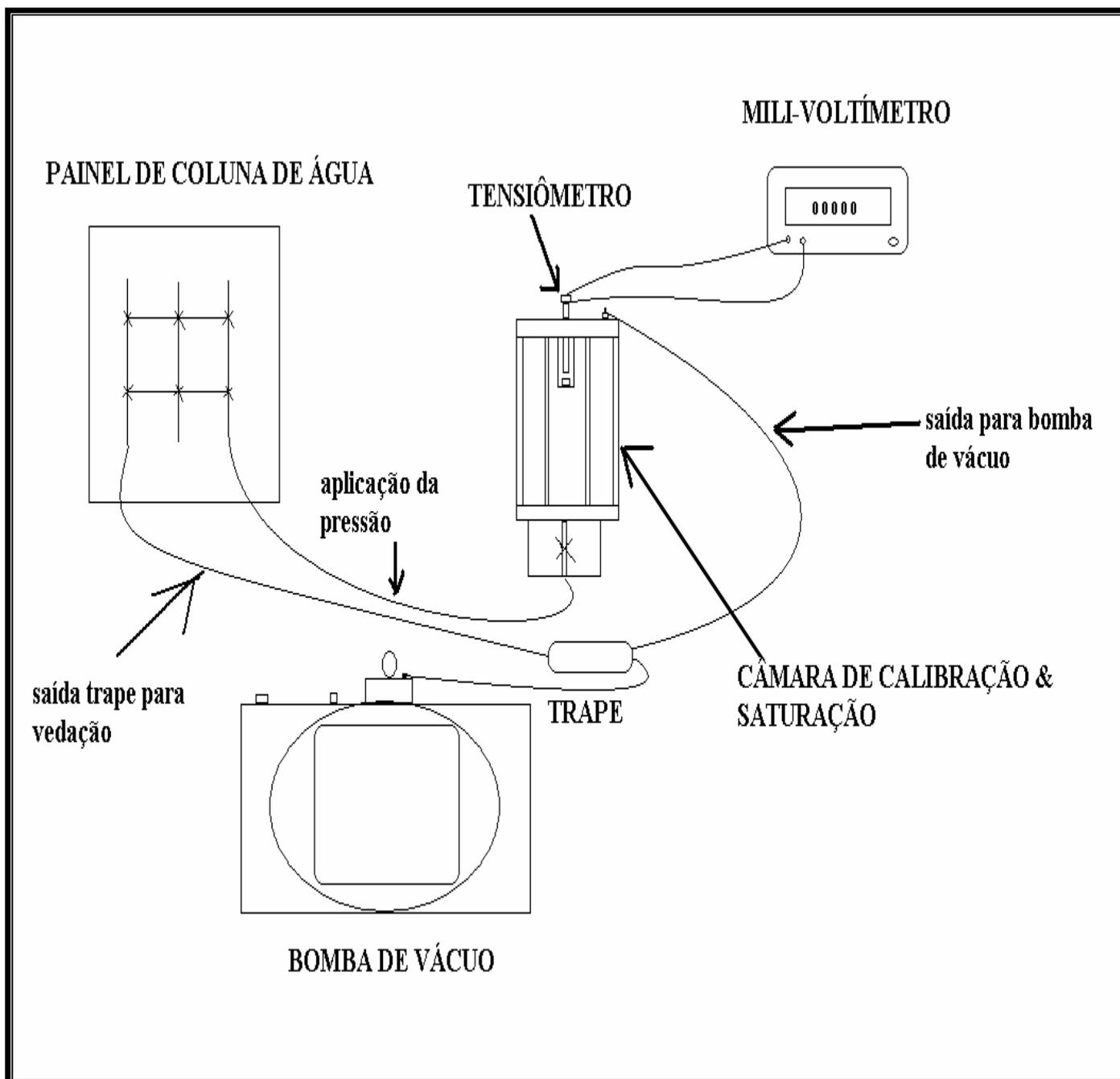


Figura 6.10: Esquema do sistema de saturação-calibração.

6.2 – Instrumentação

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

Há existência de muitos tipos de instrumentos para o monitoramento da umidade do solo. A água do solo pode ser medida através de instrumentos que determinam o teor de umidade ou a sucção matricial. O teor de umidade 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.

Os instrumentos de controle e medida foram instalados em todos os tanques, seguindo um padrão homogêneo com uma variação da profundidade na qual foram colocados. As profundidades às quais foram instalados os instrumentos são de 15cm e 30cm e isto se deve do fato da subdivisão do perfil de solo em parcelas aproximadamente equidistantes.

Os instrumentos instalados nos tanques foram as seguintes:

Para Tanque A:

- Um tensiômetro TENSE - ASH 1 a 15 cm de profundidade.
- Um tensiômetro TENSE-ASH 2 a 15 cm de profundidade.
- Um tensiômetro automatizado T4 (UMS) a 15cm – T4-A15
- Um tensiômetro automatizado T4 (UMS) a 30cm – T4-A30
- Um tensiômetro de equivalência (Delta – T) a 15 cm – EQ2-A15
- Um tensiômetro de equivalência (Delta – T) a 30 cm – EQ2-A30
- Uma sonda theta ML2 (Delta – T) a 15 cm – TDR-A15
- Uma sonda theta ML2 (Delta – T) a 30 cm – TDR-A30
- Um termopar a 15cm – TMP-A15
- Um termopar a 30 cm – TMP-A30
- Papel filtro (sucção total) a 15 cm – PFT-A15
- Papel filtro (sucção total) a 30 cm – PFT-A30
- Papel filtro (sucção matricial) a 15 cm – PFM-A15
- Papel filtro (sucção matricial) a 30 cm – PFM-A30

Para Tanque B:

- Um Tensiômetro TENSE-EPXO 1 a 15 cm de profundidade
- Um tensiômetro TENSE –EPX 1 a 30 cm de profundidade.

- Um tensiômetro automatizado T4 (UMS) a 15cm – T4-B15
- Um tensiômetro de equivalência (Delta – T) a 15 cm – EQ2-B15
- Uma sonda theta ML2 (Delta – T) a 15 cm – TDR-B15
- Um termopar a 15cm – TMP-B15
- Papel filtro (sucção total) a 15 cm – PFT-B15
- Papel filtro (sucção matricial) a 15 cm – PFM-B15

Para Tanque c:

- Um tensiômetro automatizado T4 (UMS) a 15cm – T4-C15
- Um tensiômetro de equivalência (Delta – T) a 15 cm – EQ2-C15
- Uma sonda theta ML2 (Delta – T) a 15 cm – TDR-C15
- Um termopar a 15cm – TMP-C15
- Papel filtro (sucção matricial) a 15 cm – PFM-C15

Um total de 20 instrumentos foi utilizado durante os ensaios. Os instrumentos foram colocados bem centralizados e buscando uma equidistância razoável e evitando uma aproximação aos laterais dos tanques para minimizar-se o efeito dos bordos e maximizando a distribuição nos mesmos. A escolha destes instrumentos decorre do fato que os mesmos já tem o seu uso difundido na engenharia e pela sua simplicidade de manuseio na sua grande maioria; além da sua grande acurácia comprovada. Os seguintes instrumentos foram aplicados nos ensaios além dos novos tensiômetros de sucção elevada já descrito:

6.2.1 - Tensiômetro automatizado T4 (UMS):

O tensiômetro automatizado é do modelo UMS T4A (UMS GmbH - Munich, Germany) usado em uma ampla variedade de aplicações. O seu intervalo de leitura varia de +100 a -85 Kpa. Há um transdutor de pressão localizada na parte inferior, próximo à cápsula porosa, tendo alta resolução nas mensurações contínuas da tensão da água no solo.

Após tempos em que o solo encontra-se seco, quando o potencial matricial alcançar sucções acima de -80 Kpa, o tensiômetro T4A necessita de reposição de água deaerada no interior da cápsula porosa. Seus limites de temperatura variam de 0 a + 50° C, sem maiores danos no sistema de transmissão (membrana transdutora). Sua grande vantagem é rapidez de resposta e larga alcance de pressão de equilíbrio, em torno de 60 Kpa/h. O tensiômetro automatizado T4A é apresentado na Figura 6.9-1&2:

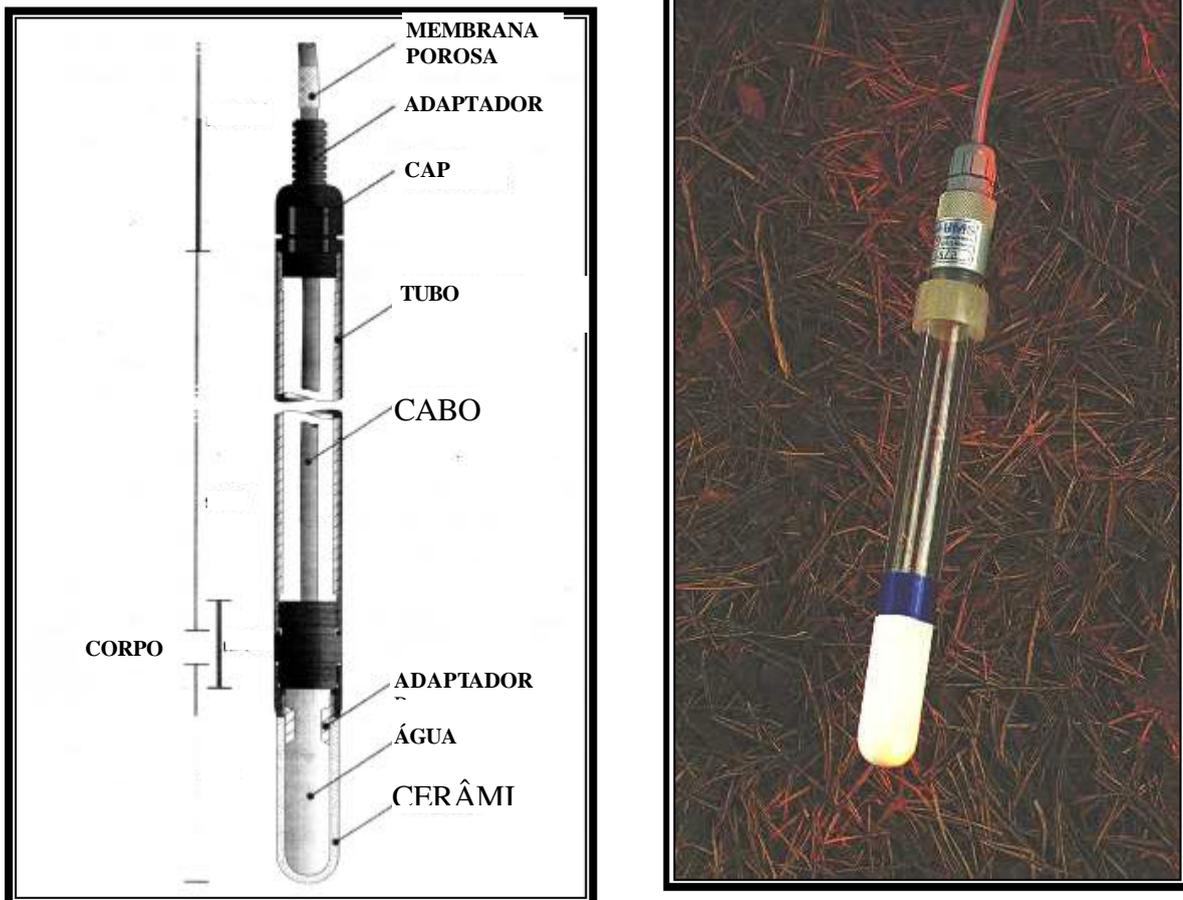


Figura 6.9-1&2: Tensiômetro automatizado T4A, desenvolvido na Alemanha (UMS-GmbH, DE, 2000).

A tensão na água medida é sofre uma conversão pela membrana transdutora, em sinais elétricos (mV) contínuos definidos. Estes sinais são determinados pelo uso de um voltímetro e fonte de alimentação ou transmitidos a qualquer data logger, registrando e armazenando esses sinais automaticamente.

7.2.2 - Sonda Theta ML2 (Delta - T) (TDR)

A sonda Thetaprobe ML2 (Delta – T Devices, Cambridge, UK) é um instrumento de fabricação inglesa que mensura diretamente a umidade do solo, correspondendo ao conteúdo de umidade volumétrica, θ_v , através do princípio de refletometria no domínio do tempo (TDR), ou seja, as mudanças na constante dielétrica aparente, são convertidas em uma voltagem direta, virtualmente proporcional ao teor de umidade do solo (LACERDA et Al, 1997).

O instrumento consiste de um “corpo” impermeável, o qual contém componente eletrônico, apresentando na sua extremidade um conjunto três de hastes de 6,0 cm de comprimento, afiadas de aço inoxidável, que são introduzidos no solo conforme se vê na Figura 6.10, com suas respectivas dimensões em mm:

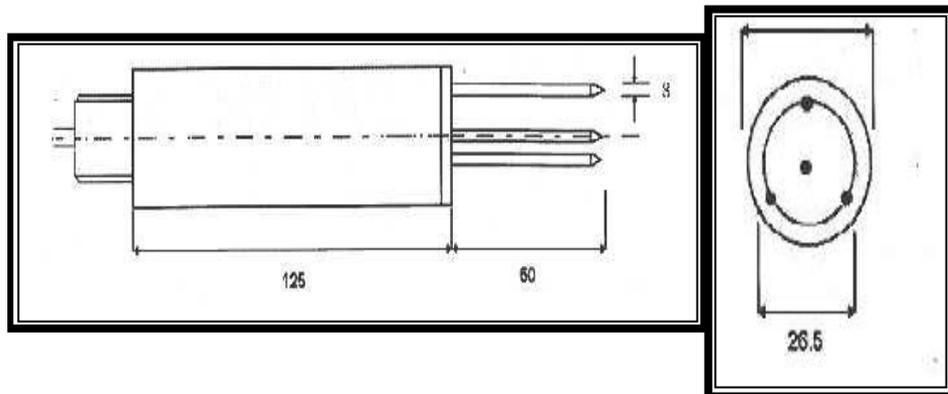


Figura 6.10: Representação esquemática da Sonda Theta ML2 (Delta-T Devices, UK, 2000).



Figura 6.11: Sonda Theta ML2 (Delta – T Devices, UK, 2000).

O fornecimento de energia é garantido através do cabo conectado ao corpo do instrumento, acoplado à fonte externa de alimentação e resgata os sinais analógicos de saída. Estes sinais analógicos de saída, produzidos pela sonda, medem a umidade das propriedades.

6.2.3 - Tensiômetro de Equivalência (Delta - T) (EQ2)

O Tensiômetro de Equivalência ou Equitensiômetro EQ2 é composto por uma sonda Theta comum (Delta-T Devices, Cambridge, UK) e um corpo de equilíbrio, conforme a Figura 12 e 13. O tensiômetro de equivalência utiliza a 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 entra em equilíbrio com o potencial matricial do solo envolvido, onde é detectada pela sonda Theta, quando absorvida. Seu funcionamento baseia-se de equivalência de potencial matricial entre o material do solo e o corpo do instrumento se encontram em equilíbrio.

Em princípio 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 sua precisão de leitura em sucções de 0 a -100 kPa, é de ± 10 kPa. Com o aumento do domínio de medição, seu uso pode ser limitado conforme cada caso em questão. 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 rápido a alteração, tanto menor é o efeito da histerese (Tabela 6.5). 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 prática está bastante abaixo desses valores. Isto confirma também a proximidade de valores medidos com o tensiômetro de pressão. 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. 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.

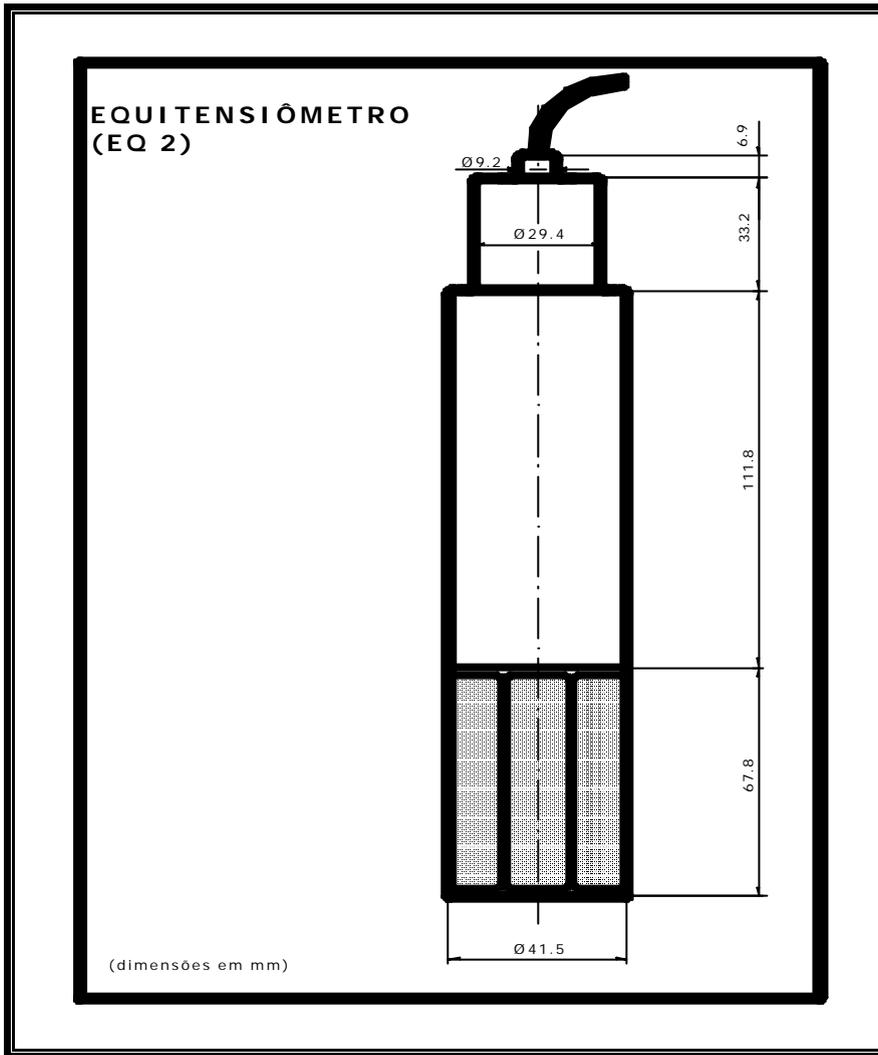


Figura 6.12: - Esquema do Equitensiômetro EQ2



Figura 6.13: - Tensiômetro de Equivalência – Equitensiômetro EQ2 (Delta – T Devices, UK, 2000).

Tabela 6.5: - Efeito da histerese no Equitensiômetro EQ2 (UP – GmbH, DE, 2000).

Potencial Matricial Mudança Absoluta		Erro na medição em hPa por minutos							
Pa x 100	Pa x 100/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: Pode-se ressaltar que os valores foram obtidos por secagem rápida, e eram muitos maiores do que a realidade.

A aplicação do EQ2 é vantajosa, pois não necessita de pequenas regulagens rotineiras como nos tensiômetros comuns. Ele funciona em um intervalo de temperatura entre -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 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.

6.2.4 - Geotermômetro (TMP)

O sensor de temperatura do solo aplicado nos ensaios é do tipo Termistor de 10K ou 10000 Ohms (Figura N°11), que é bastante comum no ramo da eletrônica, funcionando como uma resistência, permitindo ou não a passagem de corrente. Sua possibilidade de leitura tem uma variação de -20.0 a $+60.0^{\circ}\text{C}$ com um erro de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, fabricado pela UP – GmbH.

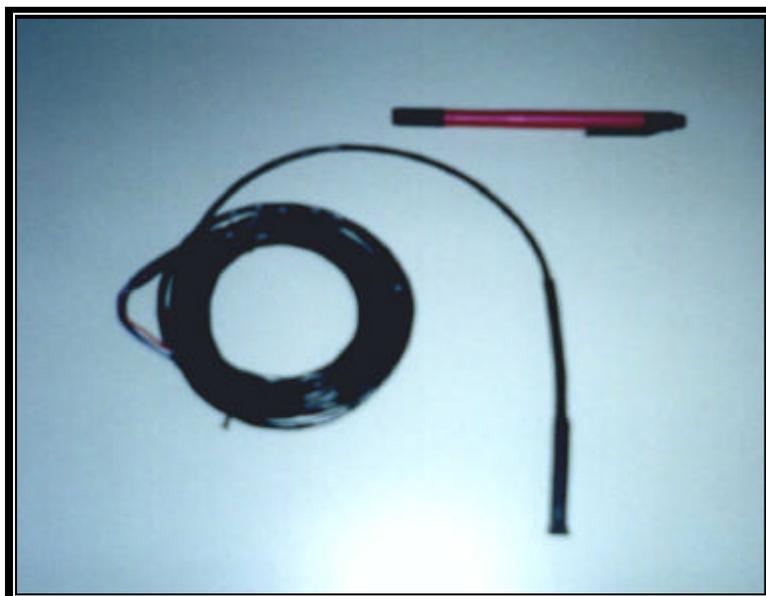


Figura 6.14: - Geotermômetro Automatizado – TMP (UP – GmbH, DE, 2000).

O geotermômetro TMP assim como os demais instrumentos automatizados podem ser conectados a qualquer data logger, tendo uma leitura da temperatura do solo de forma contínua, sendo de grande utilidade nas correlações com dados ambientais externos, como temperatura e umidade relativa.

As temperaturas do solo mensuradas ao longo do trabalho encontram-se adiante.

6.2.5 - Papel filtros:

Para garantir na calibração o alcance do equilíbrio do papel filtro numa sucção conhecida, deixa-se o sistema durante um período mínimo de equalização de 7 dias. Após o equilíbrio, retira-se e pesa-se o papel e após seco em estufa a 105° C durante 24 horas. Relacionou-se então a umidade obtida com a sucção gerada. Para garantir a não perda de umidade na remoção do papel filtro, usou-se sacos plásticos pequenos para transportar os papéis filtros, além de estes sacos introduzidos em pequena caixa de isopor. O papel filtro aplicado nos ensaios é o Whatman nº 42. Para o papel filtro Whatman nº 42 (CHANDLER et Al., 1992), temos as seguintes expressões abaixo e a figura de curva de calibração, em função do teor de umidade do papel; expressões que servem tanto para sucção total quanto para a matricial. Assim:

Para umidade > 47%

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(6,05-2,48 \log w)} \quad (6.1)$$

Para umidade < 47%

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(4,84-0,0622w)} \quad (6.2)$$

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

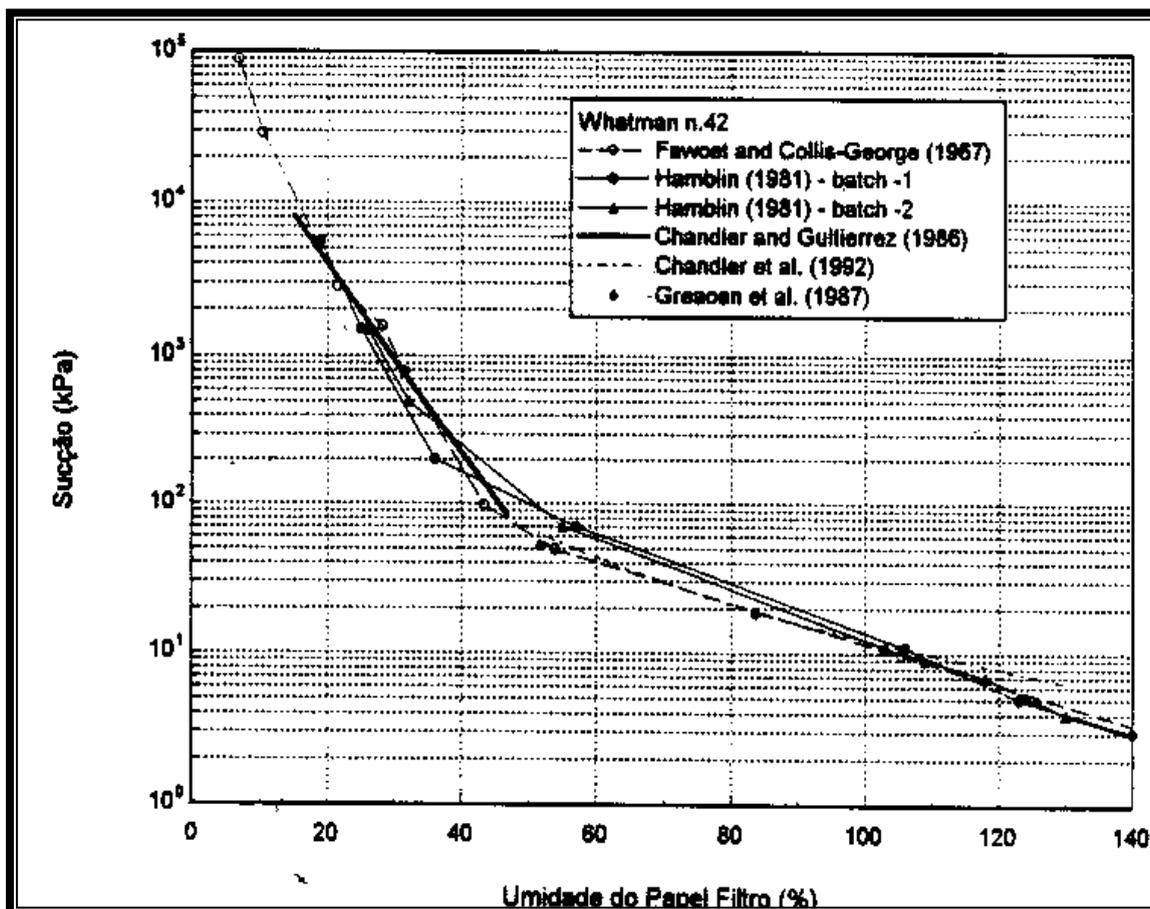


Figura 6.15: – Curvas de calibração para o papel filtro Whatman N°42

Foram aplicadas duas técnicas de ensaio de papel filtro conforme a grandeza de sucção a determinar.

- No caso da determinação de sucções totais

Para garantir que não haja contacto entre o papel filtro e a matriz do solo, usou-se a técnica aplicada por MAHLER (1997), Figura 6.15, empregando um tubo de PVC equipado de um dispositivo que mantém o papel filtro no meio do tubo sem entrar

em contato com suas paredes, num furo de profundidade requerida no solo. Pelo formato do papel-filtro, o dispositivo presente no interior do cilindro de PVC, que se resume em uma tira colada longitudinalmente na parede do tubo e tem como função afastar o papel-filtro da parede tubo PVC. É introduzida uma quantidade de papel filtro definida pelo numero de ensaios que precisaremos efetuar, marcando a data inicial da introdução do amostrador no solo. Após o tempo mínimo de equilíbrio, executa-se os passos descritos acima.

Os dados mensurados encontram-se na Tabela 6.6.

Tabela 6.6: Tabela da mensuração de sucção total.

PAPEL-FILTRO SUCCÃO TOTAL	Data de Instalação	Data de leitura	Tempo de ensaio	Local	Peso Papel úmido (g)	Peso Papel seco (g)	Umidade (%)	Tensão de sucção (kPa)
	10/6/2003	18/6/2003	8dias	TQA30cm	0,2673	0,2217	20,57	3636*
		25/6/2003	15dias		0,2767	0,2199	25,83	1712
	11/6/2003	18/6/2003	7dias	TQA15cm	0,2685	0,2232	20,30	3781*
		25/6/2003	14dias		0,2770	0,2161	28,18	1222
		22/7/2003	41dias		0,2783	0,2206	26,16	1633
	11/6/2003	18/6/2003	7dias	TQB15cm	0,2645	0,2232	18,50	4887 *
		25/6/2003	14dias		0,2844	0,2212	28,57	1156
		22/7/2003	41dias		0,2759	0,2256	22,30	2839



Figura 6.16: Papel filtro para determinação de sucção total

- No caso da determinação de sucções matriciais

Aplica-se o método proposto por MCQUEEN y MILLER (1966, 1968). Coleta-se as amostras num dia determinado e a na profundidade desejada. Coloca-se a amostra coletada num recipiente completamente vedável. Coloca-se então em cada recipiente uma dupla de papel-filtro acoplado um ao outro, e garantindo-se o contacto do conjunto com o solo. Guardam-se os recipientes num ambiente de aproximadamente 20° C durante três semanas. Após o tempo mínimo de equalização de 7 dias, retira-se o conjunto e pesa-se o papel que não estava em contacto direto com o solo assim como o outro que estava em contacto direto, assegurando assim a possibilidade de avaliar a parcela das partículas de solo que possam aderir no papel.

Os valores da tabela abaixo representam a mensuração de sucção matricial nos solos ensaiados.

Tabela 6.7: Tabela da mensuração de sucção matricial com papel filtro.

Ensaio realizado por :

PAPEL-FILTRO SUÇÃO MATRICIAL	Data de Instalação	Data de leitura	Tempo de ensaio	Local	Peso Papel úmido (g)	Peso Papel seco (g)	Umidade (%)	Tensão de sucção (kPa)	
	25/6/2003	2/7/2003	7dias	TQA30cm	0,2979	0,2271	31,18	796	
					0,3048	0,2330	30,82	838	
	14/7/2003	29/7/2003	14dias		0,2694	0,212	27,08	1432	
					0,2791	0,2201	26,81	1488	
	25/6/2003	2/7/2003	7dias		TQA15cm	0,2900	0,2176	33,27	589
						0,2781	0,21	32,43	665
	14/7/2003	29/7/2003	14dias			0,2725	0,2125	28,24	1213
						0,2781	0,2174	27,92	1269
	25/6/2003	2/7/2003	7dias			TQB15cm	0,2886	0,2156	33,86
0,2826							0,2115	33,62	561
18/7/2003	1/8/2003	14dias	0,2858	0,219			30,50	877	
			0,2839	0,2176			30,47	881	
25/6/2003	2/7/2003	7dias	TQC15cm	0,2825			0,2169	30,24	909
				0,3072			0,2130	44,23	123
18/7/2003	1/8/2003	14dias		0,3243	0,2240		44,78	113	
				0,3195	0,2295		39,22	252	
25/6/2003	2/7/2003	7dias		TQC15cm	0,3198		0,2305	38,74	269
					0,3198		0,2305	38,74	269

❖ Determinação de umidade gravimétrica.

A determinação da umidade gravimétrica apresentou - se como um dado complementar bastante perspicácia como elemento de comparação entre a mesma e a umidade mensurada pelos instrumentos. Por efeito, optou-se em medir a umidade gravimétrica do perfil do solo, em datas precisas. As amostras foram coletados através de um sistema simples composto por um cilindro de P.V.C. de 5 centímetros de altura que nos permite uma coleta por profundidade sem amolgar o solo. As amostras coletadas são pesadas e depois de colocadas em estufa a 110°C durante 24 horas após as quais repete se a pesagem das mesmas. Foram efetuadas duas amostragens em datas

diferentes nos solos ensaiados. A partir da umidade gravimétrica, calcula-se a umidade volumétrica. Os resultados de umidade determinados estão na tabela abaixo.

$$w = \frac{\text{massa..amostra.úmida..} - \text{.massa.amostra.sec a}}{\text{massa.amostra.sec a}} \times 100 \quad (6.3)$$

onde w é a umidade gravimétrica.

$$q = \frac{\text{volume.de.água}}{\text{volume.de.amostra}} \times 100 \quad (6.4)$$

onde q é a umidade volumétrica

$$q = d.w \quad (6.5)$$

onde d é a densidade seca aparente do solo.

Tabela 6.8: Resultados da determinação de umidade gravimétrica ? .

humidade gravimetrica (g)-----Densidade aparente d= 1,42												
Profundidade	tqA				tqB				tqC			
cm	peso amum	peso amsec	? (%)	? (%)	peso amum	peso amsec	? (%)	? (%)	peso amum	peso amsec	? (%)	? (%)
0-2,5	42,57	36,26	17	25	20,05	17,38	15	22	27,97	24,28	15	22
2,5-5	35,30	29,65	19	27	24,87	21,28	17	24	24,54	21,35	15	21
5-7,5	26,19	22,10	19	26	26,75	22,57	,19	26	24,39	21,09	16	22
7,5-10	21,78	18,27	19	27	24,18	20,23	20	28	26,70	22,84	17	24
10-12,5	20,19	16,51	22	32	22,99	19,17	20	28	21,00	17,63	19	27
12,5-15	32,77	26,89	22	31	32,23	26,81	20	29	27,73	23,03	20	29
15-17,5	26,19	21,73	21	29	34,04	28,30	20	29	25,00	20,68	21	30
17,5-20	24,85	20,54	21	30	27,02	22,15	22	31	35,44	29,23	21	30
20-22,5	28,42	22,82	25	35	31,38	25,28	24	34	29,28	24,32	20	29
22,5-25	24,52	20,36	20	29	35,43	28,30	25	36	29,50	24,37	21	30
25-27,5	25,70	21,73	18	26	28,14	22,43	25	36	24,23	20,02	21	30
27,5-30	24,91	21,64	15	21	33,74	27,09	25	35	23,92	19,71	21	30
30-32,5	23,67	20,01	18	26	19,66	15,78	25	35	37,27	30,76	21	30
Data	10 de junho 2003											

❖ Sistema de Aquisição de Dados Automatizados (Data - Logger DL2e)

O data logger é um equipamento capacitado em realizar leitura e armazenar dados providos de uma diversidade 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, aplicado nos ensaios (Delta-T Devices, Cambridge, UK), é apresentado na Figura N°13. Este equipamento 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 6.17: Data Logger DL2e (Delta-T Devices, UK, 2000)(Mendes,2000)

O Delta - T Logger DL2e tem 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. 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.

Na instalação dos instrumentos, este equipamento foi configurado para aquisição de dados diários com um intervalo de leitura dependendo do tipo de instrumento. Para cada sensor foi feita uma configuração específica:

Tabela 6.9: - Configurações do software para aquisição de dados.

<u>Sensores</u>	<u>Unidade</u> <u>Base</u>	<u>Fator de</u> <u>conversão</u>	<u>Leitura</u>
TENSE-EPX 1; TENSE-EPXO 1; TENSE-ASH 1; TENSE-ASH 2.	mV	1	mV
T4-A15; T4-A30; T4-B15; T4-C15	mV	0,104	kPa
EQ2-A15; EQ2-A30; EQ2-B15; EQ2-C15	mV	1	mV
TDR-A15; TDR-A30; TDR-B15; TDR-C15	mV	0,5	mV
TMP-A15; TMP-A30; TMP-B15; TMP-C15	k?	Promtb	° C

6.3 – CONCEPÇÃO DOS LISÍMETROS & CARATERIZAÇÃO DOS SOLOS ENSAIADOS

6.3.1 - Concepção dos lisímetros de laboratório

Optou-se à concepção de lisímetros de drenagem sem nível freático baseada no modelo de lisímetro de Thornthwaite pela sua simplicidade, seu baixo custo e sua eficácia em determinar balanço hídrico em períodos longos de meses.

Foram concebidos dois mini-lisímetros de laboratório cujas dimensões em centímetros são de 160x60x60 em madeira de compensado naval e chapa de vidro para melhor visualização do comportamento do solo e do eventual líquido percolado conforme a Figura 6.17.

A escolha destes materiais deve-se pelo fato do compensado naval ser um material altamente resistente à umidade e não absorver a água além de seu custo bastante acessível e o vidro cumprindo as mesmas características, além de nos permitir uma visualização do escoamento do percolado através o perfil da matriz do solo.

A madeira foi impregnada de uma pasta semi-elástica impermeável e as suas juntas vedadas por silicone naval de alta resistência. No fundo do lisímetro foi aplicada uma camada de concreto expandido impermeabilizado e com uma inclinação de 2% para forçar a saída da água drenada pela torneira de coleta de água. Essas medidas servem para o bom funcionamento da estanqueidade do lisímetro. Uma camada de 10cm de brita foi colocada no fundo, acima da base de concreto e esta revestida por uma manta de geotextil OP 300 para servir de filtro e impedir passagem de partículas finas que poderiam colmatar a camada drenante. O Conteúdo dos lisímetros difere-se pelo tipo de solo colocado e pela presença de outros componentes necessários para os ensaios.

❖ No mini-lisímetro 1, denominado de (tanque A), a amostra colocada tem caracterização apresentada adiante. O solo foi colocado em camadas respeitando a ordem dos horizontes do perfil de origem. Na matriz do solo foi introduzido um geodreno que se define como um tubo furado de 15cm de diâmetro e tem como função uma melhor aeração do solo e ao mesmo tempo drenar a água, portanto um acelerador de drenagem do solo. O geodreno atravessa a caixa diagonalmente, buscando a ocupar a sua maior distância e percorrendo profundidades variáveis em todo o perfil do solo; tendo as suas extremidades sobre saído acima da superfície e parte de seu corpo em contato com a camada drenante de brita no fundo do tanque, fazendo com que haja um fluxo de ar através da matriz de solo pela comunicação direta com a atmosfera, e

também um fluxo de água através do geodreno que neste caso serve como dreno do tipo rebaixamento de nível de água.

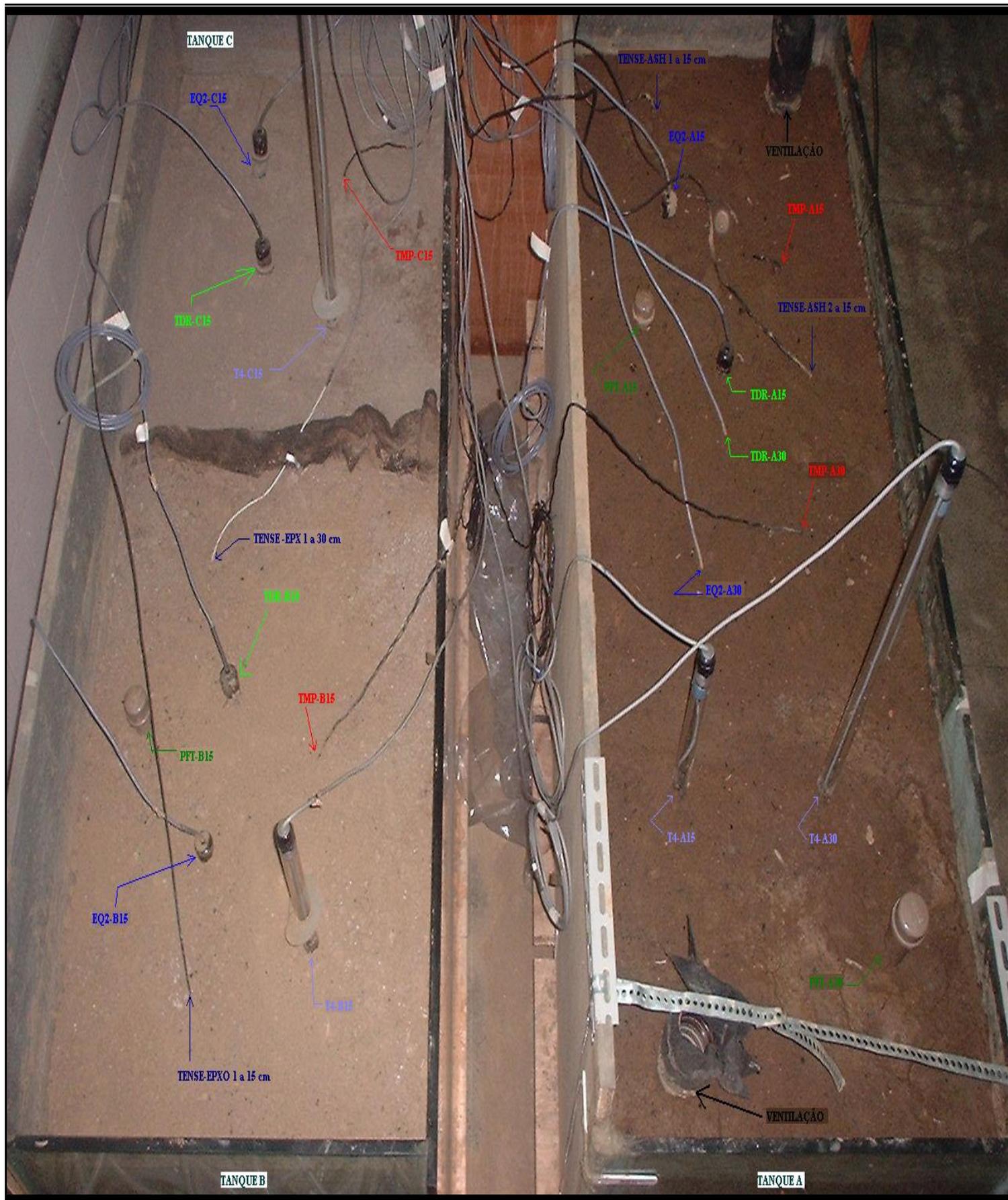


Figura 6.17: - Mini-lisímetros 1 & 2 (Tanques A, B & C)

❖ O mini-lisímetro 2 foi dividido no meio por uma geomembrana recoberta por um geotextil e cada lado foi denominado de tanque B e tanque C.

No tanque B colocou-se o mesmo solo que no tanque A respeitando o mesmo processo de colocação, mas sem a presença de geodreno. O tanque C foi preenchido pelo solo anteriormente ensaiado por MENDES (2000) e PACHECO (2001) para servir de elemento de comparação e cujas características estão a seguir.

➤ **Processo de saturação dos solos.**

Em seguida à colocação dos solos e instalação dos equipamentos, inicio-se a saturação total das amostras ensaiadas. Para tal, através de uma mangueira e da fonte de água cuja vazão foi determinada, encheu-se os mini-lisímetros, vedando a saída de água, impedindo assim o início do processo de drenagem. Determinou-se o tempo decorrido para que o solo ficasse totalmente submerso. A drenagem começa após 24 horas de submersão, pois assim, estima-se que obtivemos o tempo necessário para expulsar o ar livre do solo, pela ação do peso da água, considerando as dimensões reduzidas dos tanques e a ausência de radiação solar. Determina-se então a vazão de saída de água assim como o tempo decorrido para finalizar a drenagem. Os valores na Tabela 6.10 a seguir representam as quantidades de água colocada e drenada para cada lisímetro. No caso do lisímetro dos tanques B e C, interpolou-se então a quantidade retida para cada solo, baseando-se nos dados de leitura de umidade determinados pelos equipamentos em cada tanque e pelo volume de solo presente em ambos.

Tabela 6.10:- Dados da saturação do solo dos mini-lisímetros.

	Unidade	Tanque A	Tanque B	Tanque C
Comprimento	m	1,56	0,95	0,7
Largura	m	0,59	0,595	0,595
Profundidade	m	0,37	0,35	0,41
Volume de solo no Tanque	m ³	0,34	0,20	0,17
			0,37	
Vazão	l/s	0,092	0,080	
Tempo de preenchimento	s	1800	2100	
Volume d'água colocada	l	166	168	
Volume d'água captada	l	105	109	
Volume d'água retida	l	61	59	

			36	23,5
Relação água/ solo	l/m ³	180	180	138

6.3.2 - Características dos solos ensaiados

6.3.2.1 - Solo do tanque A e B.

A classificação do solo usado, neste tanque, pela sua origem, indica que é um solo residual maduro.

As análises físico-químicas foram realizados pelo laboratório da Embrapa; assim como a classificação pedológica.

A sua classificação pedológica se define como:

CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico argissólico, textura média, A proeminente, hipodistrófico, caulínico, hipoférrico, muito profundo, ácido, fase floresta tropical subperenifólia, relevo montanhoso.

Localização: sítio da Cachoeira (sr Izaltino), 4º distrito (Barra Alegre) de Bom Jardim-RJ. Coordenadas 22°15'30 "S. e 42°17'30" W. Gr. Folha Quartéis.

Situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil: terço inferior, declive de 60 a 70%.

Altitude: 850 metros.

Litologia, formação geológica e cronologia: migmatito, Unidade Rio Negro, Pré-Cambriano.

Material originário: produto de alteração das litologias supracitadas.

Tabela 6.11: - Caracterização física química do solo in-situ dos tanques A & B (LAPS-EMBRAPA/CNPS).

horizonte	Frações da amostra total g/kg	Composição granulométrica do solo fino. g/kg	Argila dispersa	Graude flocu	Relação silte/argil	Densidade e g/cm ³	Porosidade %
-----------	-------------------------------	--	-----------------	--------------	---------------------	-------------------------------	--------------

Símbolo	Profundidade cm	Calhaus >20 mm	Cascalho 20-2 mm	Terra fina <2 mm	Areia grossa 2-0,2 mm	Areia fina 0,2- 0,05 mm	Silte 0,05- 0,002 mm	Argila <0,0 02 mm	Resíduo em água g/kg	Umidade %	pH	Complexo sorptivo cmol _c /kg			Saturação por alúminio %	Partículas
												Valor S (soma)	Valor A Al ³⁺	Valor T (soma)		
Horizonte	Água	KCl 1N	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S (soma)	Al ³⁺	H ⁺	Valor T (soma)	Valor V (sat. por bases) %	Saturação por alúminio %	P assimilável mg/kg			
A	0-18	0	45	955	454	109	201	236	128	46	0,85	1,43	2,70	47		
B	-36	0	25	975	479	97	201	223	122	45	0,90	1,40	2,60	47		
2	36- 60	0	32	968	412	130	193	265	204	23	0,73	1,27	2,60	51		
A	5,5	4,5	6,3	1,1	0,43	0,03	7,9	0,1	6,2	14,2	56	1	38			
B	4,6	3,8	1,9	0,7	0,14	0,02	2,8	1,1	5,6	9,5	29	28	1			
2	4,6	4,0	0,8	0,4	0,09	0,01	1,3	1,3	3,7	6,3	21	50	1			

➤ **Granulometria**

Tabela 6.12: - Índices físicos do solo dos tanques A & B.

Tanque	Peso específica g/cm ³	Peso específico das partículas g/cm ³	Peso específico seco g/cm ³	umidade %	e	n	S	A
TQA	1,42	2,7	1,34	0,06	6	1,02	0,50	0,84
TQB	1,46	2,7	1,39	0,05	5	0,95	0,49	0,84
TQA	1,90	2,7	1,52	0,25	25	0,78	0,44	0,14
TQB	1,85	2,7	1,50	0,23	23	0,80	0,44	0,22

Tabela 6.13:- Caracterização da densidade dos grãos do solo dos tanques A & B

DENSIDADE REAL DOS GRÃOS					
PICNÔMETRO N ^o			52	8	15
TEMPERATURA DA ÁGUA E SOLO (°C)		T	23	23	23
CÁPSULA N ^o					
PICNÔMETRO + SOLO SECO			161,13	177,33	180,39
PICNÔMETRO			90,56	103,28	108,68
PICNÔMETRO + ÁGUA		W _w	592,69	602,55	609,32
PICNÔMETRO + SOLO + ÁGUA		W _{ws}	636,29	648,27	653,57
SOLO SECO (g)		W _s	70,57	74,05	71,71
ÁGUA DESLOCADA (W _s + W _w - W _{ws})			26,97	28,33	27,46
FATOR DE CORREÇÃO		K	0,9976	0,9976	0,9976
DENSIDADE REAL DOS GRÃOS		G _s	2,610	2,608	2,605

$W_s \cdot K / (W_s + W_w - W_{ws})$	MÉDIA	2,608
--------------------------------------	-------	-------

➤ **Índice de Plasticidade e Limite de Líquides**

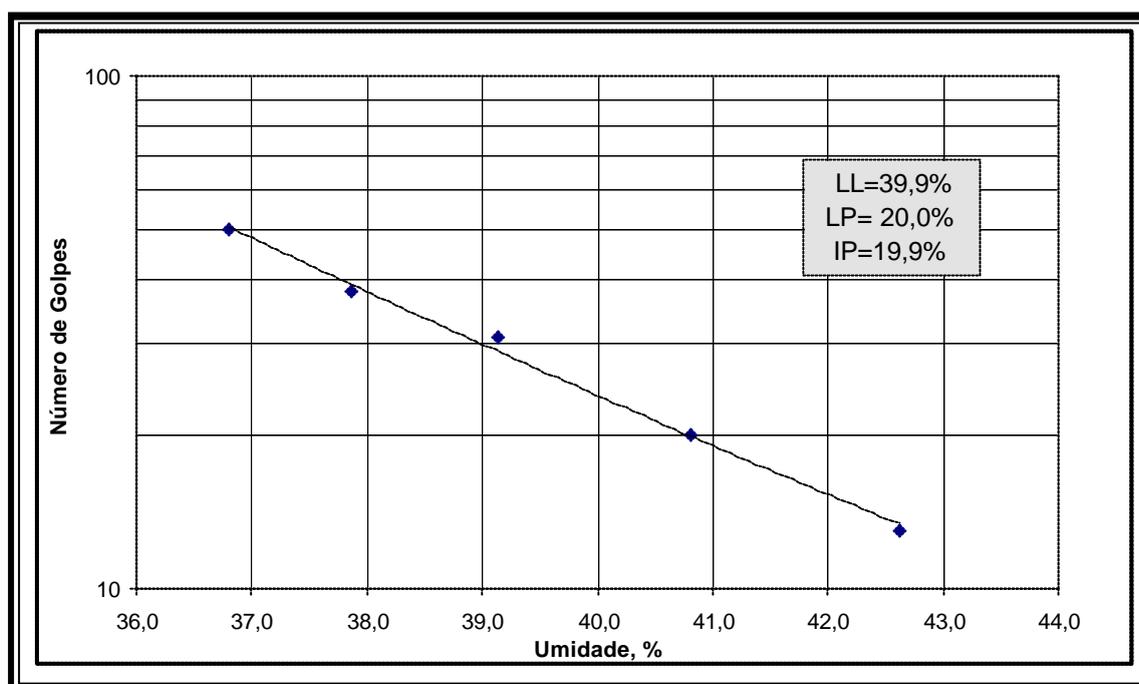


Figura 6.19: - Caracterização dos limites de Atterberg do solo dos Tanques A & B

➤ **Curvas de Retenção de Umidade**

Foram traçadas e dispostas no Figura abaixo as curvas de Retenção de Umidade, feitas a partir das amostras coletadas no campo em diferentes profundidades. Estes dados servem de referências para base de comparação com os dados coletados nos ensaios nos tanques A e B.

Tabela 6.14: - Dados da caracterização da curva de retenção de umidade do solo dos tanques A & B (LAPS-EMBRAPA/CNPS).

Profundidade (cm)	% Umidade	SUCÇÃO - MPa					
		0,006	0,01	0,033	0,1	0,5	1,5
0-5	56	29,5	27,8	24,4	21,5	18,3	14,9
-10	60,8	29,4	27,7	24,5	21,6	18,9	15,3

-20	53,7	31,6	29,8	26,2	23,2	20,2	16,6
30-35	56	33,4	31,8	28,3	25	21,5	18,4
60-65	45,4	32,9	31,2	28	24,8	19,5	14,9

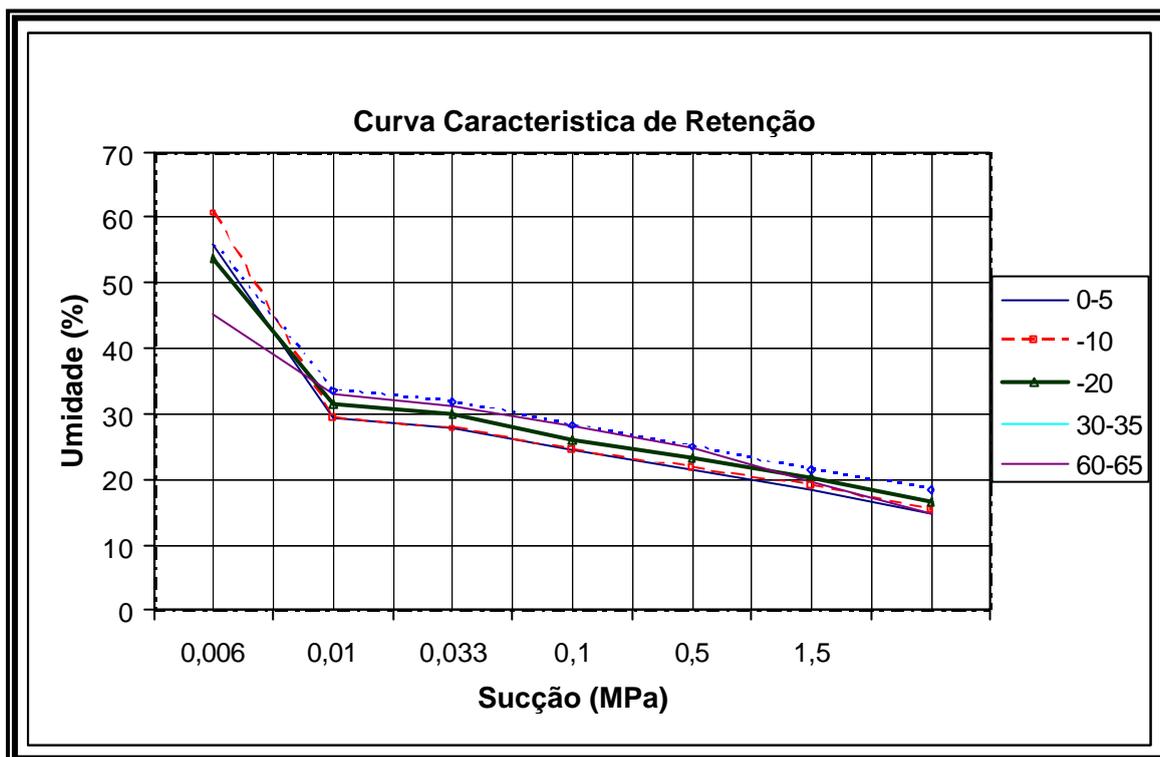


Figura 6.20: - Curva característica de retenção de umidade do solo dos tanques A & B (LAPS-EMBRAPA/CNPS)

➤ **Condutividade Hidráulica do solo**

A condutividade hidráulica do solo in-situ foi determinado cronologicamente de acordo com as profundidades e os resultados apresentados na Tabela e Figura respectivamente 6.15 e 6.21.

Tabela 6.15: Dados de condutividade hidráulica do solo in-situ (Tq A & B) (LAPS-EMBRAPA/CNPS).

SOLO IN-SITU	Profundidades		Condutividade Hidráulica
	5.0	0-5	11,82
10	5/out	17,52	
20	out/20	5,412	
30	30-35	16,68	
60	60-65	0,096	

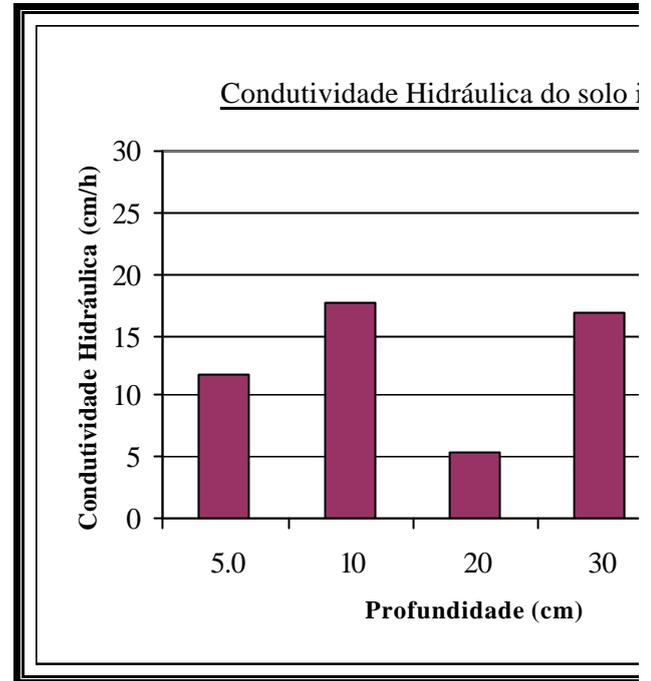


Figura 6.21: Condutividade hidráulica do solo in-situ (Tq A&B) (LAPS-EMBRAPA/CNPS).

6.3.2.2 - Solo do tanque C

➤ Caracterização de Solo Estudado

O solo utilizado no tanque C foi o mesmo ensaiado por MENDES (2000) e PACHECO (2001) e que já havia sido caracterizada por SILVA, M. B. (1993), como um Planossolo álico, Tb abrupto, A moderado, textura areno/argilosa, fase floresta tropical sobcaducifólica, relevo suave ondulado, segundo os critérios do SNLCS (EMBRAPA/SNLCS, 1988 a e b).

Este perfil está localizado 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° 49' e 22° 45' de latitude sul e os meridianos 43° 38' e 43° 42' de longitude oeste de Greenwich.

➤ **Granulometria**

A curva granulométrica traçada em laboratório (Figura 6.22), 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 6.16). O que caracteriza um solo com predominância da fração areia, evidenciando um solo de boa drenagem.

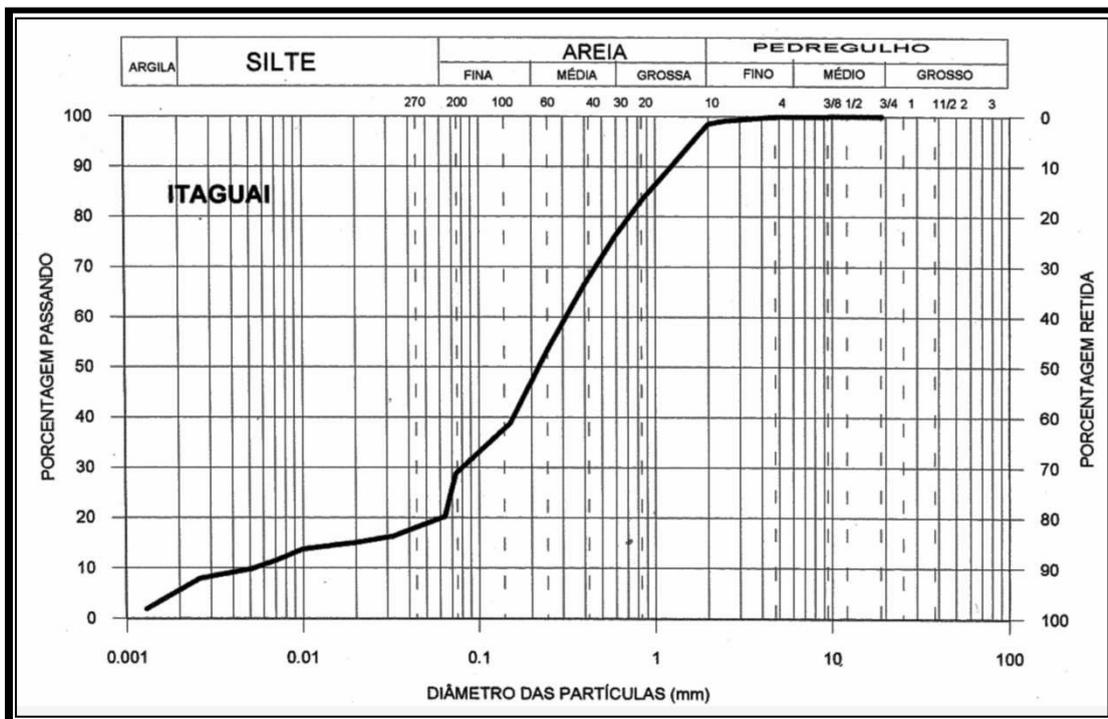


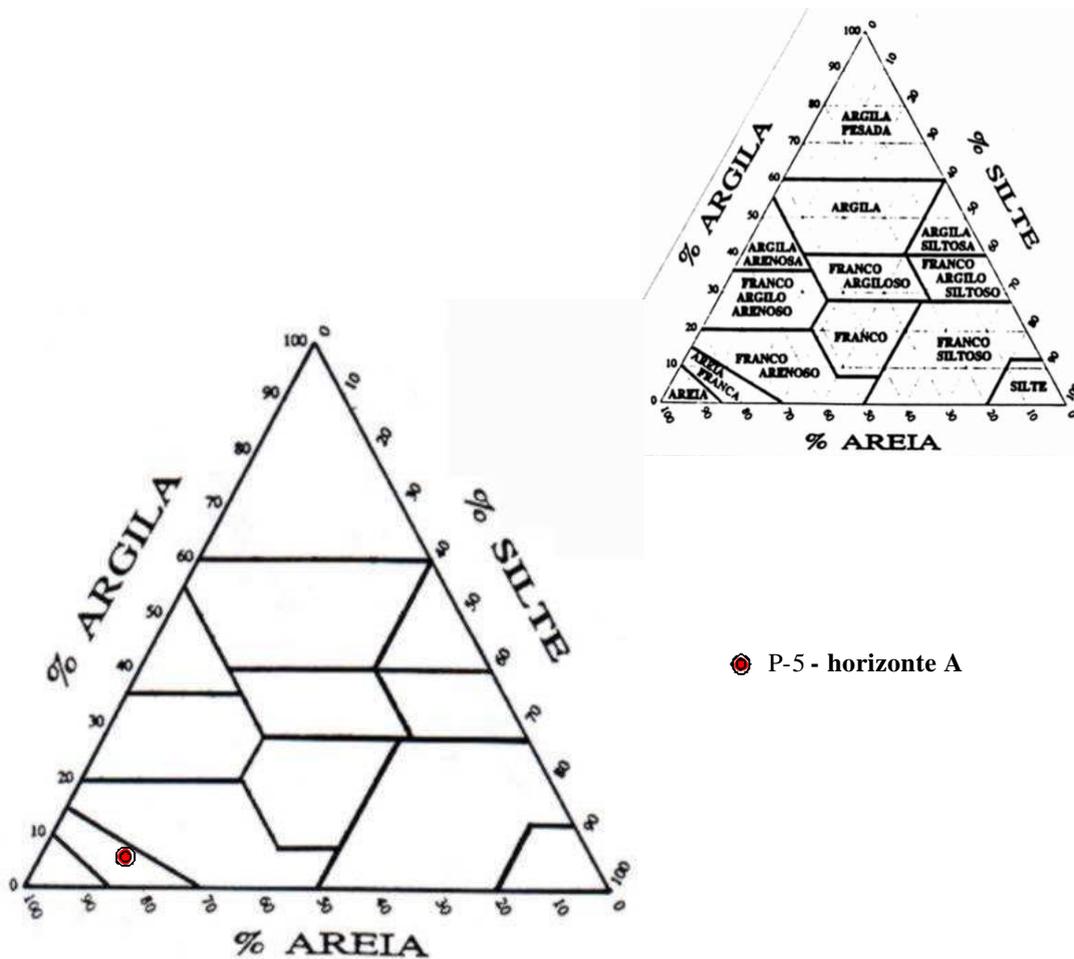
Figura 6.22: - Curva Granulométrica do solo do perfil . (MENDES, 2000).

Tabela 6.16: - Resultado da distribuição granulométrica do solo (%) do perfil (Geotecnia-PEC-COPPE-UFRJ) (Mendes, 2000).

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

➤ **Textura**

De acordo com a o triângulo para análise granulométrica (Figura 6.23) o solo se classifica como um solo de textura areia franca.



● P-5 - horizonte A

Figura 6.23: Esquema da distribuição das frações granulométricas através do triângulo textural (modificado de BRADY, 1989) (Mendes, 2000).

➤ **Estrutura**

A Tabela 6.17 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 6.17: - Resultado de densidade de partículas, peso específico aparente do solo, porosidade, micro e macro-porosidade (LAPS-EMBRAPA/CNPS) (MENDES, 2000).

Amostras	Peso específico das partículas g/cm ³	Peso específico aparente g/cm ³	Porosidade (%)	Microporosidade (%)	Macroporosidade (%)
Perfil in-situ	2.62	1.67	36.5	19.5	15.0

Tabela 6.18: - Índices físicos determinados no solo do tanque C

Tanque	peso específica g/cm ³	Peso específica das partículas	peso específico seco g/cm ³	umidade %	e	n	S	A	
TQC	1,54	2,62	1,50	0,03	3	0,75	0,43	0,11	0,89
TQC	1,97	2,62	1,59	0,24	24	0,65	0,39	0,97	0,03

➤ Índice de Plasticidade e Limite de Líquidos

A determinação dos índices físicos limite de liquidez 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).

➤ **Curvas de Retenção de Umidade**

O Figura 6.24 esta disposta a curva de Retenção de Umidade, feitas a partir das amostras coletadas no campo. Estes dados indicam que o solo coletado no horizonte A

do perfil, utilizado nos ensaios, apresenta uma umidade de saturação entre 35 a 40 % , estando esta bem próxima de sua capacidade de campo.

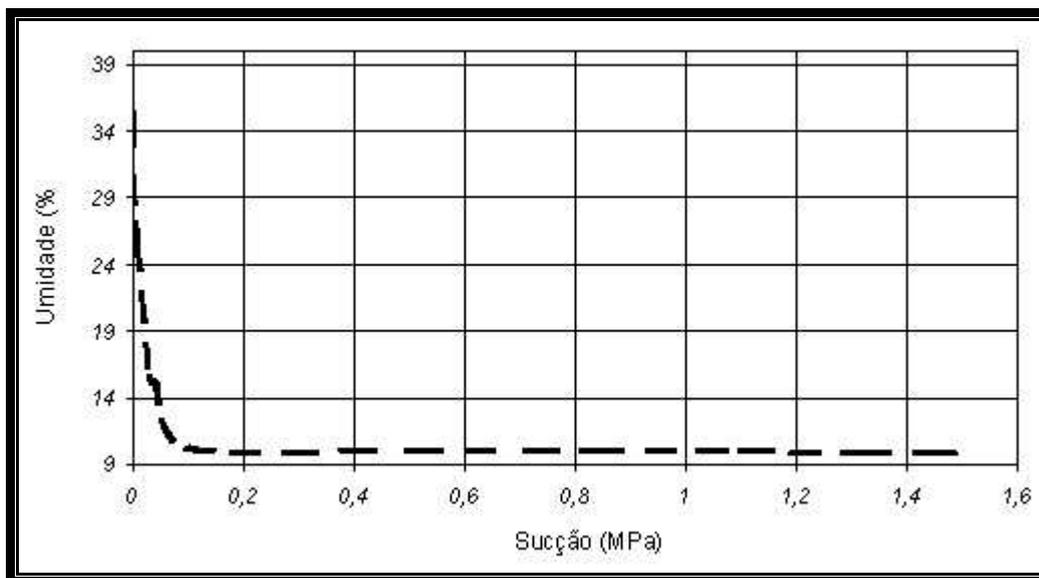


Figura 6.24: - Curva de retenção de umidade do horizonte A do perfil do solo – (LAPS Embrapa/CNPS) (MENDES, 2000).

CAPITULO 7: ANÁLISE E INTERPRETAÇÕES DOS RESULTADOS

As análises e interpretações dos resultados dos ensaios apresentam-se em três partes, seguindo o organograma do capítulo anterior. Os valores de leitura medidos maiores que zero a partir de 09 de maio de 2003 devem-se ao fato de terem ocorrido perturbações nas ligações do Data-Logger, assim como nos outros equipamentos de fornecimento de energia, embora os ensaios tenham sido iniciados em do 29 de abril de 2003. Estes fatos justificam os iniciais de sucção diferente de zero. Tais valores apresentaram pequena magnitude.

7.1- Desempenho dos TENSE.

Todos os tensiômetros de sucção elevada foram calibrados positivamente aplicando-se pressões variando de 0 a aproximadamente 700 kPa, exceto o TENSE EPXO 1 no qual foram aplicadas pressões até 406 kPa. Estas pressões foram adaptadas como limites máximos após verificação da linearização das mensurações a partir das mesmas até valores maiores. Considerou-se a função de calibração como uma função par. Neste caso sendo a função $y = f(x)$, a pressão é dada por x e o sinal elétrico de saída por y . O processo de extrapolação justifica-se pelo fato de se considerar a membrana de leitura de dados como tendo o comportamento de uma viga bi-engastada, sofrendo ação de flexão simples, portanto desenvolvendo uma deflexão igual nos dois sentidos, em relação à carga aplicada, independentemente do lado onde ela for aplicada.

Os tensiômetros de sucção elevada foram ensaiados durante um período de aproximadamente 90 dias e os resultados coletados são apresentados em tabelas e curvas correlacionados com outros equipamentos para fins de análise. Adiante apresentam-se resultados conforme o mini-lisímetro onde se fez o teste do equipamento analisado.

Foram ensaiados no mini-lisímetro 1 ou Tanque A os tensiômetros TENSE ASH 1, TENSE ASH 2 e correlacionados com o EQ2-A15 e T4-A15 na mesma profundidade. Para determinação da umidade e temperatura nesta profundidade, usou se respectivamente o TDR-A15 e o TM-A15. A Figura 7.1 apresenta o desempenho destes tensiômetros de sucção elevada durante os ensaios. De uma maneira geral, observam-se 3 faixas de evolução das pressões conforme tendência das curvas.

Faixas (0 , -200); (-200, -900); (-900, -1300).

Observa-se que os valores do EQ2-A15 são ligeiramente maiores que os dos tensiômetros na faixa de (0, -200 kPa) e na faixa de (~ -800 a -1000 kPa) onde se percebe um aumento progressivo e rápido dos valores medidos. Esta diferença na medida inicial justifica-se pela falta de precisão do EQ2-A15 na faixa de medição de (0, -100 kPa) conforme especificação do fabricante e dentro da tolerância de ± 10 kPa, enquanto que o rápido crescimento dos valores medidos na faixa de (-800 a -1000) deve-se ao fato das medidas do equipamento aproximarem-se do valor máximo de medição.

Os tensiômetros TENSE-ASH 1 e 2 comportaram-se de uma maneira similar até atingirem valores de sucções superiores a -800 kPa, observando-se a perda de pressão no tensiômetro TENSE-ASH 2 a partir deste ponto. Esta perda de pressão deve-se ao fato deste tensiômetro, com uma pedra porosa de 5 bar, ter atingido a pressão de entrada de ar e conseqüentemente formação de núcleos de ar provocando cavitação. Os valores medidos em seguida apresentam formato do tipo “dente de serra”, não retornando ao valor imediatamente à cavitação (entrada de ar). Provavelmente isto se deve ao fato de que quando tensiômetro recomeça a medir pressões negativas ocorre a expansão das bolhas de ar que entraram no momento da cavitação.

O TENSE-ASH 1 mediu pressões de sucção do solo durante todo o ensaio até valores próximos de -1380 kPa sem que houvesse cavitação. Tal fenômeno não ocorreu pois neste equipamento, provido de uma pedra porosa de 15bar, a sucção do solo não atingiu o valor de pressão de borbulhamento.

O TENSE-ASH 1 foi capaz de medir a queda brusca de sucção provocada pela saturação do tanque A no dia 28 de julho de 2003.

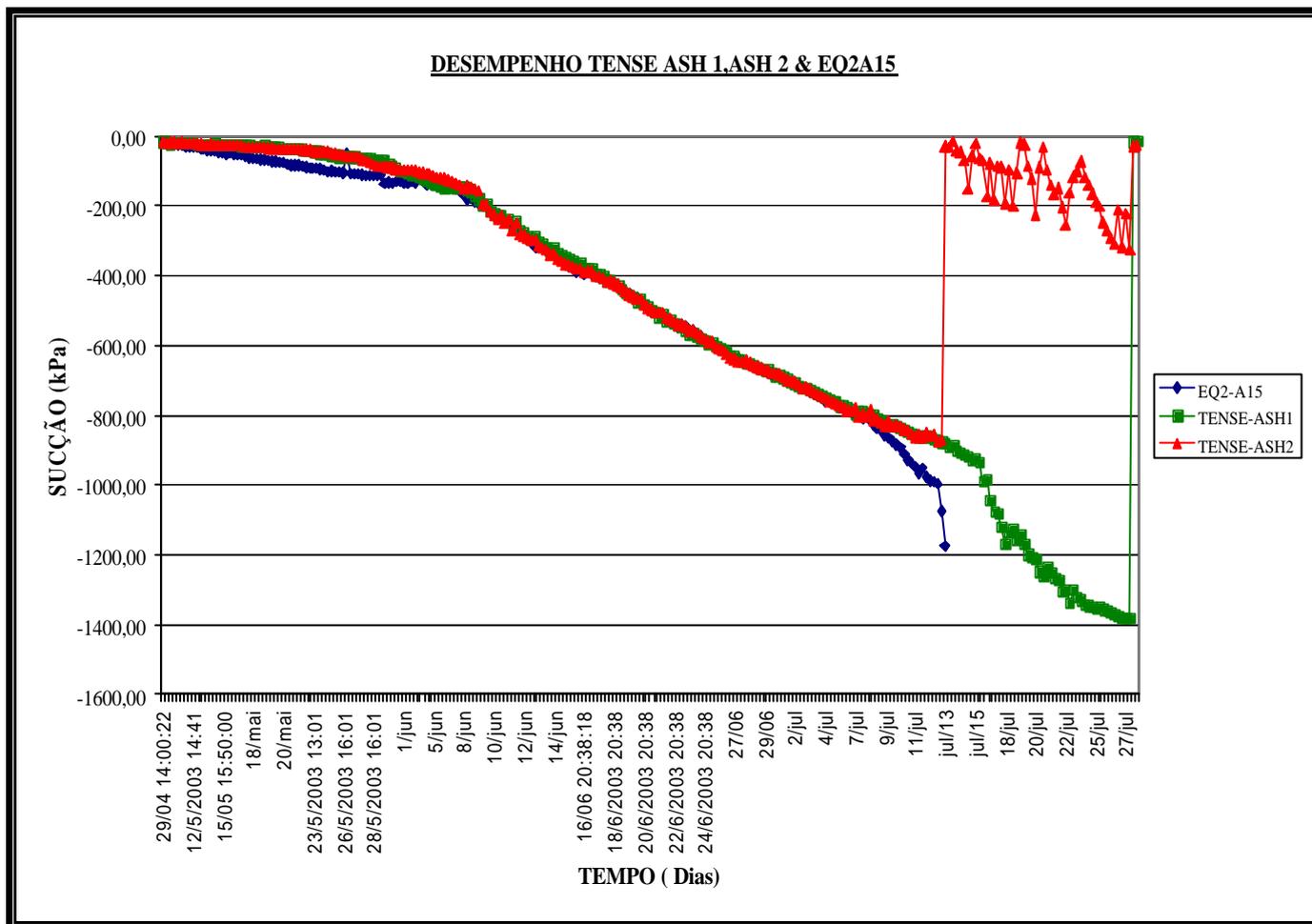


Figura 7.1: - Resultados dos tensiômetros de sucção elevada, correlacionados com o tensiômetro de equivalência ensaiados no tanque A.

Foram ensaiados no mini-lisímetro 2, ou Tanque B, os tensiômetros TENSE EPX1 e EPX01 munidos respectivamente de pedras porosas de 15 e 5bar, respectivamente. A calibração destes equipamentos se fez da mesma maneira que os tensiômetros anteriores. Os resultados apresentam-se na Figura 7.2, onde se pode verificar o comportamento dos instrumentos. As curvas de medição dos instrumentos seguem o mesmo aspecto já definido anteriormente nos equipamentos do Tanque A, isto é, a formação de três segmentos de linha com inclinações crescentes.

Diferentemente do EQ2-A15, o EQ2-B15 mediu durante todo o ensaio valores um pouco acima dos valores medidos pelos tensiômetros TENSE EPX0 1 e EPX 1; no entanto, a tendência da curva manteve-se conforme o esperado. Esta diferença dos valores na faixa de medidas acuradas (-100 a -800 kPa, no caso dos equitensiômetros) pode ser explicada pelo desgaste do equipamento após seu uso em outros experimentos

ou necessidade de re-calibração (EQ2-B15). Esta ligeira variação nos valores medidos não comprometeu as medições, já que as variações foram pequenas e constantes.

O tensiômetro TENSE-EPXO 1 mediu valores de sucção do solo com bastante precisão e de uma forma contínua até valores superiores ao valor de entrada de ar da pedra de 5 bar a ele acoplada. O valor de sucção máximo medido foi da ordem de -1483 kPa ou seja 196,6% maior que o valor da pressão de borbulhamento sem que houvesse perda de pressão nem interrupção das leituras por cavitação. Este desempenho deve-se provavelmente ao fato da maior área de contato da pedra porosa e solo e, sobretudo da minimização da área de contato entre as paredes do reservatório e a própria água, onde há maior ocorrência de bolhas de ar ou núcleos de cavitação, diminuindo a possibilidade de perda de tensão de adesão e maximizando a força de tensão pela coesão, garantindo a sustentação da tensão na água. A maior área de contato pedra / solo garantiu a continuidade das leituras, minimizando as mudanças e equilíbrio das pressões na matriz de solo.

O tensiômetro TENSE-EPX 1 introduzido a 30 cm de profundidade mediu valores de sucção bastante similares aos medidos pelo TENSE-EPXO 1 instalado a 15 cm de profundidade. A grande oscilação nas medidas no tensiômetro EPX 1 deve-se supostamente à pequena área de contacto entre a pedra porosa e o solo, já que este fenômeno não se constatou nos outros instrumentos durante os ensaios. O tensiômetro mediu valores de sucção até -1465 kPa e quando correlacionado com o TENSE-EPXO, usando as umidade a 15cm, apresentou uma diferença de pressão decrescente da ordem de 15 a 25 kPa. Não se pode afirmar que essas oscilações sejam queda de pressão partindo do fato que elas sejam relativamente pequenas e sem alteração da tendência crescente esperada da curva de sucção do solo.

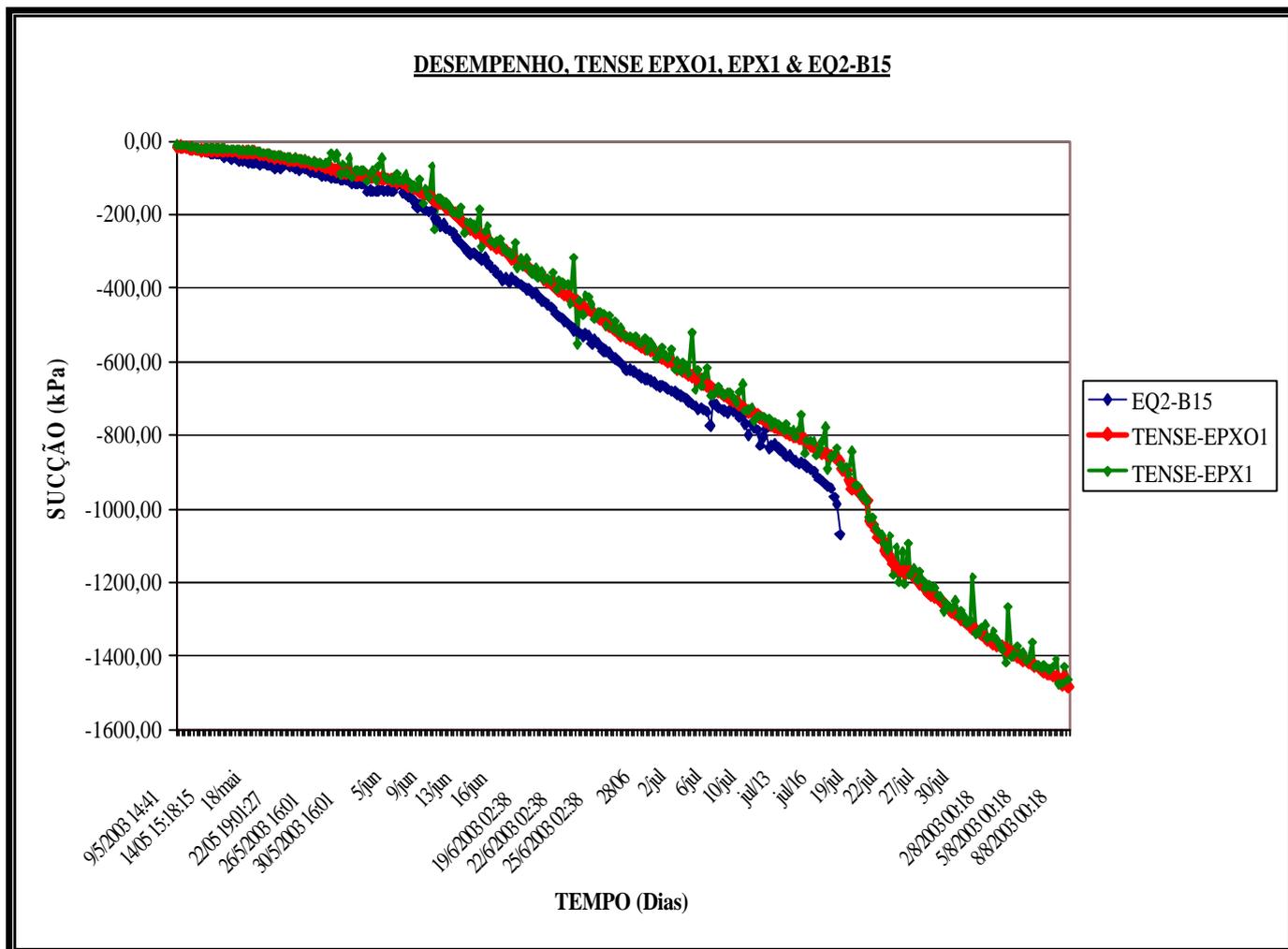


Figura 7.2: - Resultados dos tensiômetros de sucção elevada e tensiômetro de equivalência ensaiados no tanque B.

Observou-se que durante a calibração dos equipamentos, o tempo de resposta dos tensiômetros equipados com transdutores com membrana facial (EPX e EPX0 <ENTRAN[®]>) é menor que o dos tensiômetros da ASHCROFT[®] que tem um reservatório de água grande antes de chegar à membrana. Essa diferença de tempo de resposta observada foi da ordem de 1 a 3 segundos para o tensiômetro com pedra porosa de 5 bar e de 15 bar, respectivamente. Ao aplicar-se a carga, os transdutores Entran[®] medem imediatamente o valor da pressão enquanto que os da Ashcroft[®] demoram para responder até estabilizar o valor da pressão. Este fato pode se explicar pela diferença entre as membranas dos transdutores e sua fabricação.

Com relação à sensibilidade, os dois tipos de transdutores variaram adequadamente dentro de suas frações de calibração; portanto, não se registrou uma

notável diferença de comportamento quanto à histerese das suas membranas, como pode se observar na Tabela 7.4 de calibração.

Os tensiômetros do Tanque A mediram sucções maiores que os do Tanque B, na mesma data. Esta diferença de pressão decorre dos próprios lisímetros que tiveram ciclos de frente de umidade diferentes devido ao processo de secagem, portanto sucções diferentes. No entanto, a propensão do formato das curvas é bastante similar conforme o Figura 7.3 onde se pode visualizar o aspecto das curvas.

Observou-se o fenômeno de intervalo crescente entre as sucções medidas em cada tanque à medida que aumentam os valores das pressões negativas.

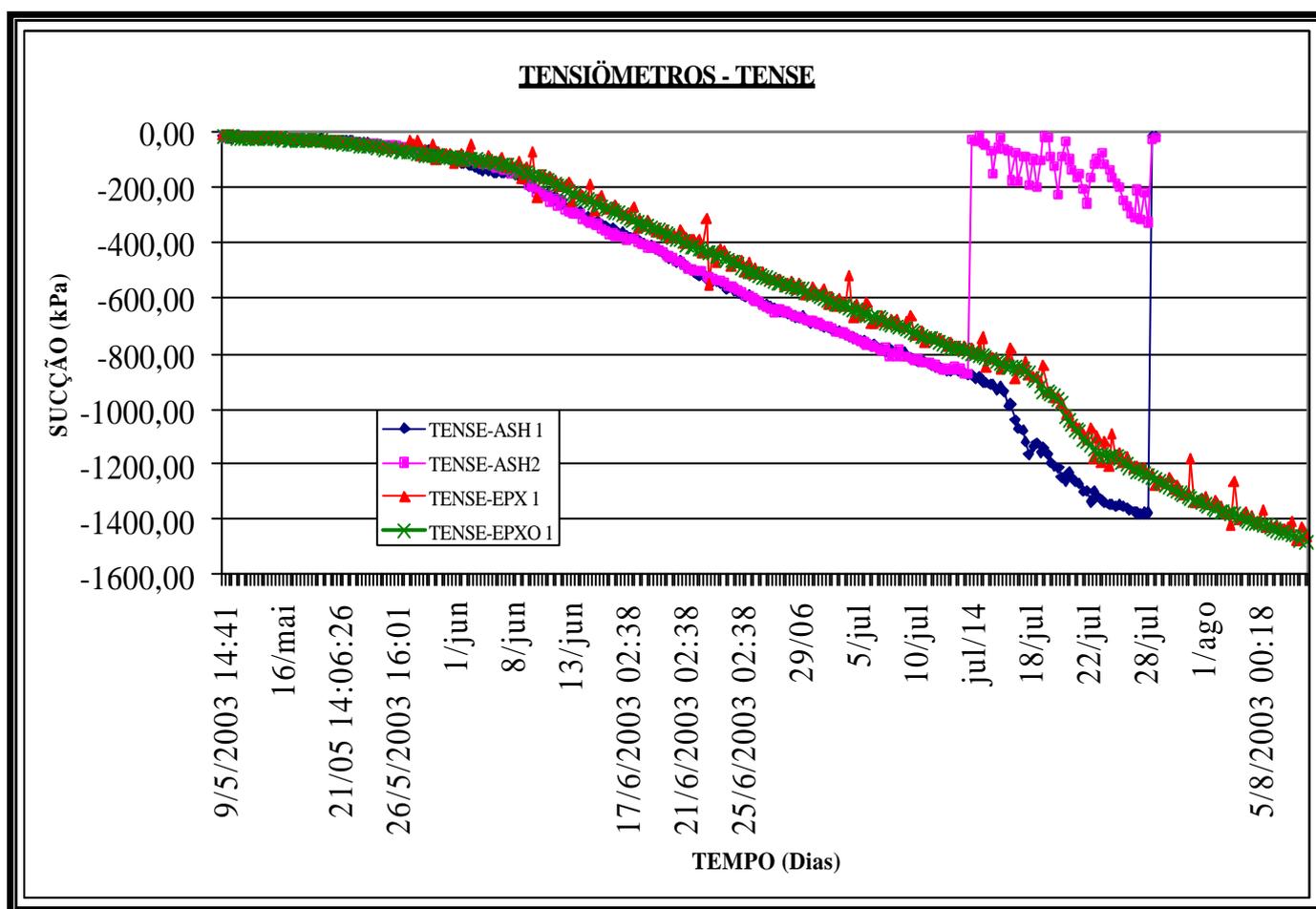


Figura 7.3: - Valores de sucção medidos pelos tensiômetros de sucção elevada nos tanques A & B.

Os novos tensiômetros desenvolvidos e ensaiados nos dois tanques apresentaram resultados significativos e um ótimo desempenho quando correlacionados com os tensiômetros comuns T4 na faixa de baixa sucções, (0 e 100 kPa) e nas mesmas umidades, como pode se ver nas Figuras 7.4 e 7.5, onde se observa também as insatisfatórias medidas dos equitensiômetros. Estes que apresentam uma curva totalmente defasada em relação às curvas dos outros instrumentos correspondentes, representando valores de sucções errôneos nesta faixa. Observou-se um intervalo diferencial maior no tanque A entre o equitensiômetro e os tensiômetros, fato este justificado pelo processo de avanço da umidade, muito maior neste tanque em relação ao tanque B. Nota-se melhor na Figura 7.5, as oscilações de medidas do tensiômetro TENSE-EPX1 conforme observado anteriormente como sendo supostamente ocasionado pela alta sensibilidade do transdutor usado em mensurar qualquer variação das condições físicas que possa ocorrer no solo.

CORRELAÇÃO
TENSE-ASH 1, TENSE-ASH 2, EQ2-A15 & T4-A15

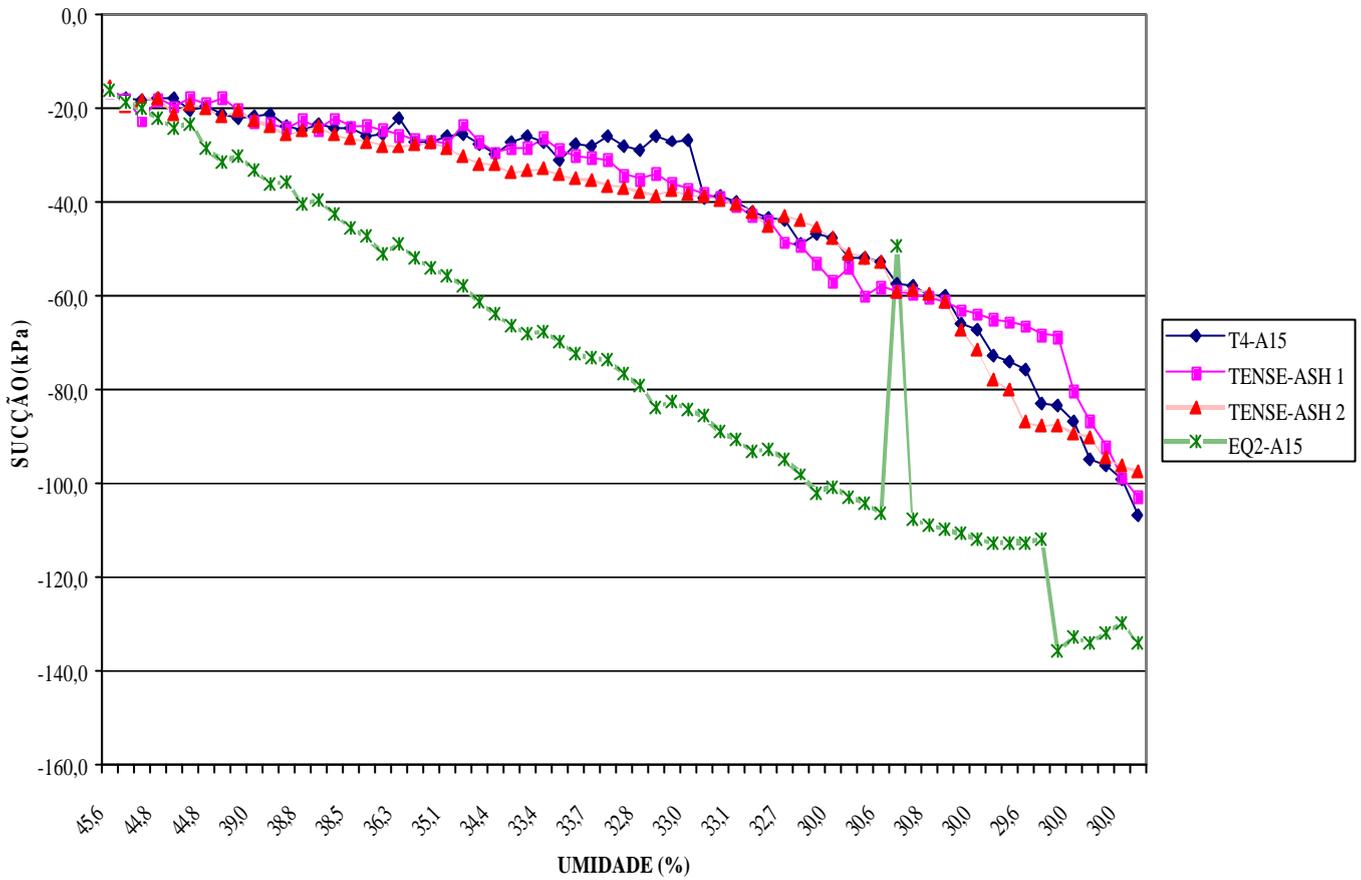


Figura 7.4: - Valores de sucção medidos pelos tensiômetros de sucção elevada, tensiômetro de equivalência EQ2 e o tensiômetro automatizado T4 (tanque A).

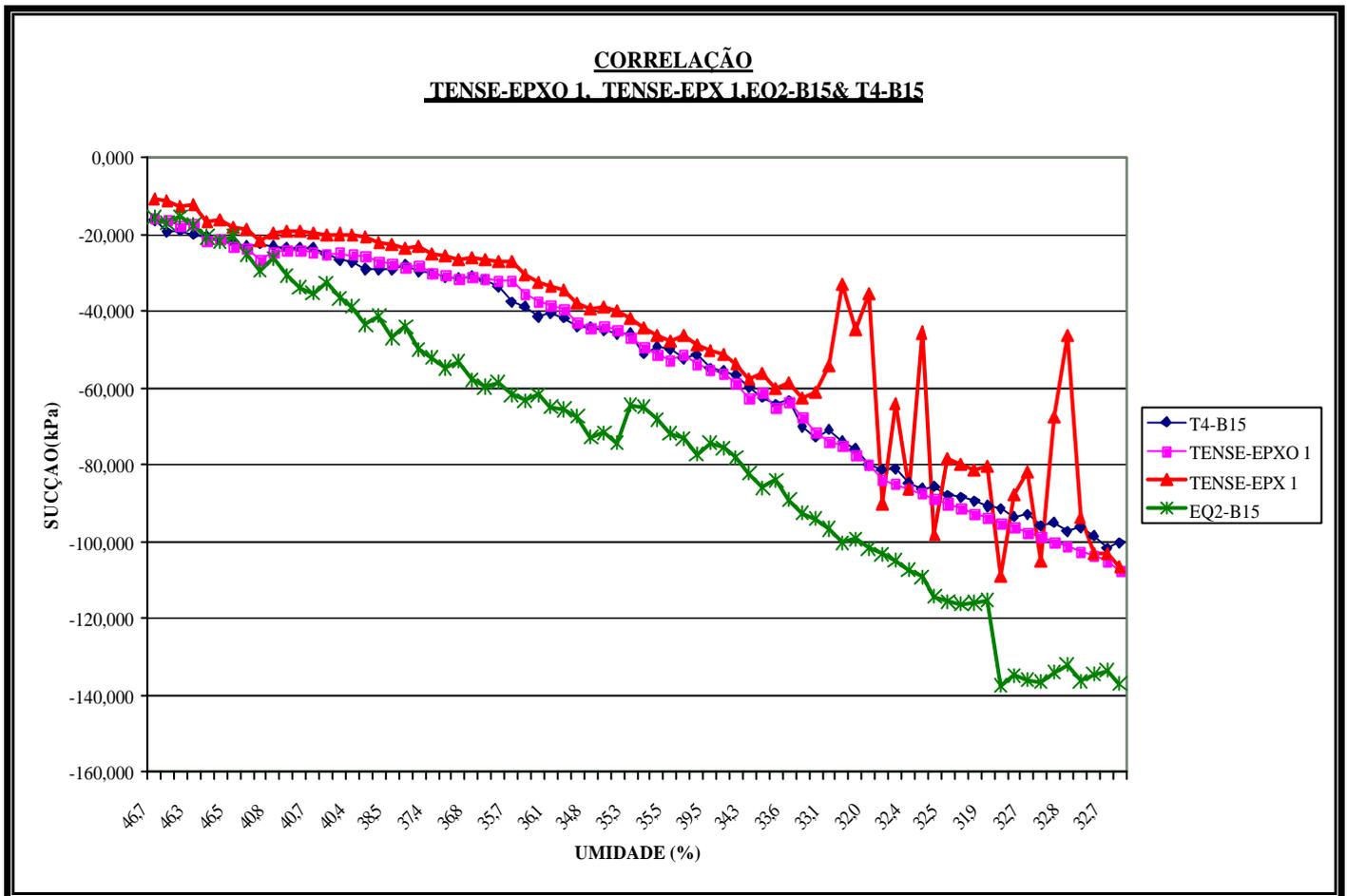


Figura 7.5: - Valores de sucção medidos pelos tensiômetros de sucção elevada, tensiômetro de equivalência EQ2 e o tensiômetro automatizado T4 (tanque B).

7.2 - Análise da instrumentação e correlações entre equipamentos

Para se assegurar as medidas efetuadas, correlacionaram-se vários equipamentos de leitura automatizada para determinação de sucção de solo e usou-se ainda outra técnica de determinação de pressão negativa: o papel filtro, conforme será descrito ao longo deste item.

As sucções mensuradas nos solos dos diferentes tanques pelos diferentes equipamentos foram relacionadas com as umidades medidas pelo TDR instalado em cada mini-lisímetro. Os resultados estão representados nas Figuras 7.6 e 7.7 sob forma de curva característica dos solos dos mini-lisímetros.

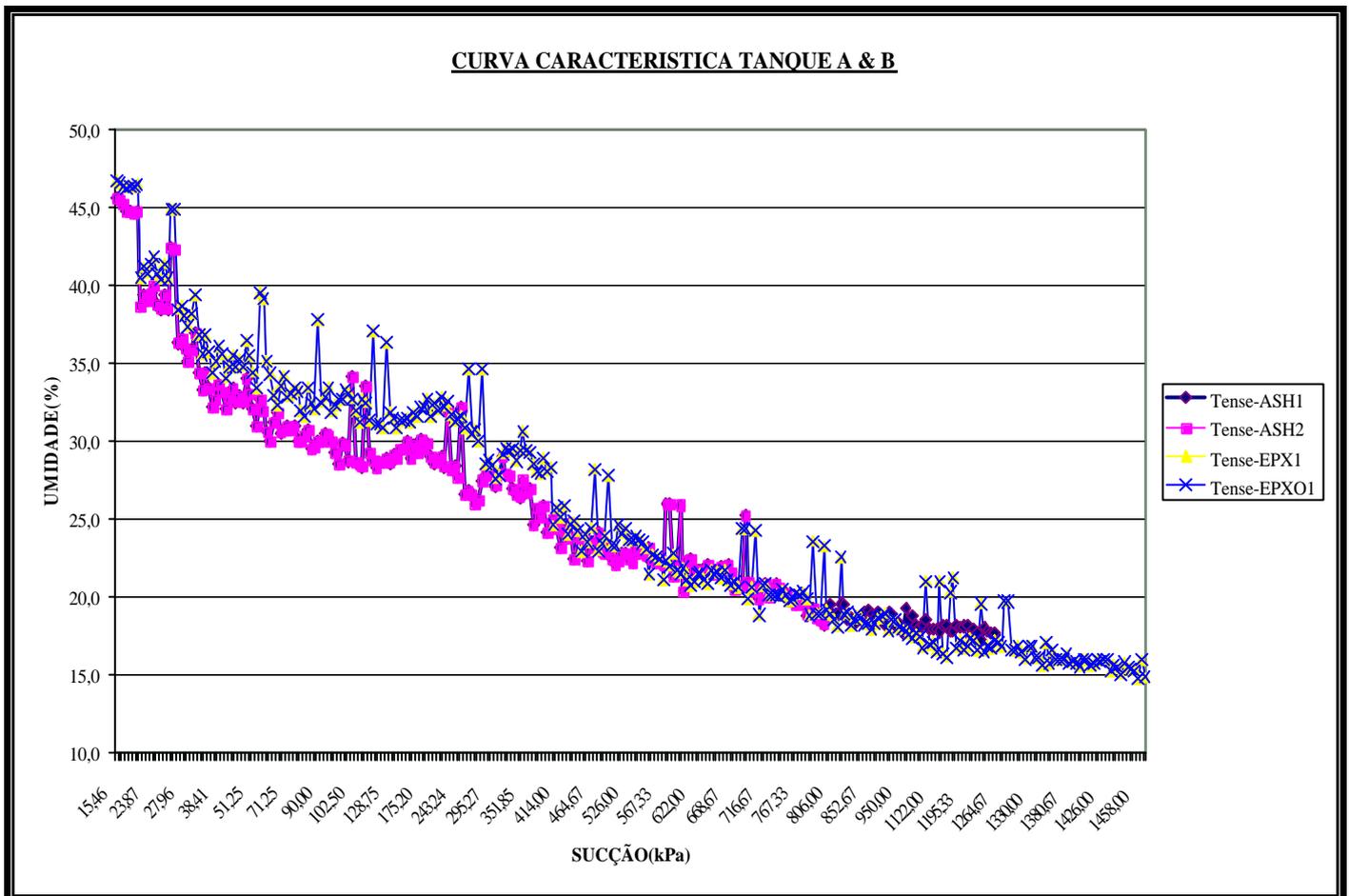


Figura 7.6: - Aspecto da curva característica de retenção de umidade a partir dos dados do tensiômetros de sucção elevada e TDRs.

A Figura 7.6 apresenta uma correlação das poro-pressões negativas nos tanques A e B com os tensiômetros de sucção elevada. Observou-se uma propensão das curvas de sucção similar para todos os tensiômetros novos.

As curvas características dos solos nos tanques A e B assim representadas pelos dados mensurados pelos tensiômetros de sucção elevada são rigorosamente similares às curvas características determinadas no laboratório da Embrapa.

A similaridade do aspecto das curvas características do solo nas condições de campo e dos solos dos lisímetros demonstrou a possibilidade de se reproduzir condições de campo em laboratório com bastante precisão, delimitando-se parâmetros de contorno.

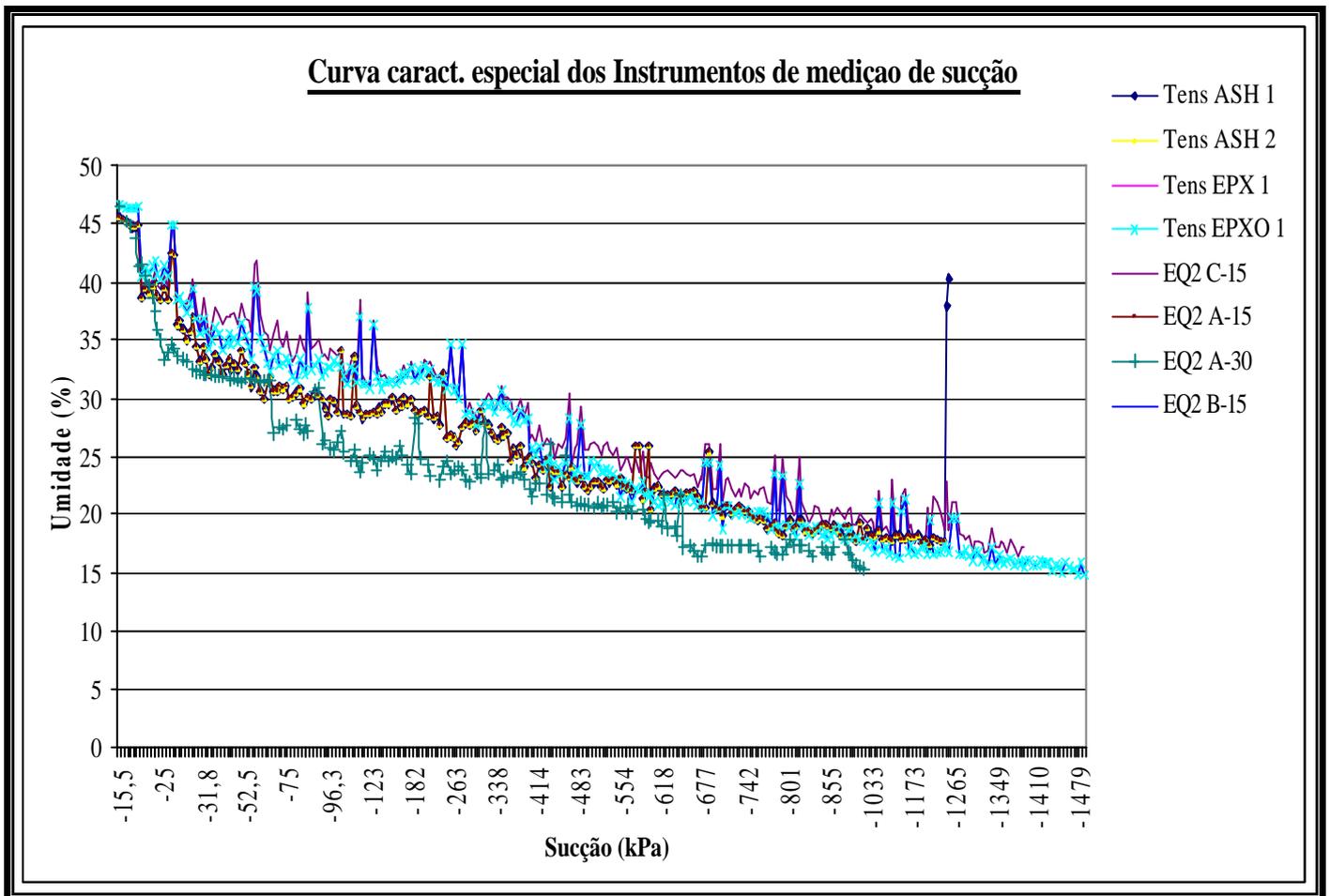


Figura 7.7: - Aspecto da curva característica de retenção de umidade a partir dos dados do tensiômetros, tensiômetro de equivalência e TDRs.

A tentativa de reproduzir as condições físicas de campo em laboratório é válida, partindo dos argumentos da comparação das curvas características de ambas, e para validação deste fato, pode-se comparar os valores dos índices físicos do solo in-situ (Tabela 7.12) com os dos lisímetros (Tabela 7.13), onde se observam valores bastante próximos.

As correlações entre os novos tensiômetros de sucção elevada e os equitensiômetros revelam a veracidade do uso destes últimos como equipamento de monitoramento da sucção no solo e desempenhando o papel de controlador da boa funcionalidade dos equipamentos novos desenvolvidos.

Os resultados obtidos pelo tensiômetros de equivalência (Figuras 7.4, 7.5 e 7.7), mostraram-se pouco significativos para sucções abaixo de -100 kPa como já mencionado anteriormente, mesmo que as referências do fabricante tenham indicado uma resposta com precisão considerável a um erro de ± 10 kPa nesta faixa de pressão. Este fato já tinha sido revelado por Mendes (2000) o que nos permite afirmar que os equipamentos não medem pressões negativas acuradas nestas faixas de pressão. Quando as tensões superam os -100 kPa, os equitensiômetros mediram os valores de sucção de forma satisfatória, chegando em certos casos a ter valores bastante próximos aos outros instrumentos de medição de sucção (Figuras 7.1 & 7.2); e atingiram valores de sucções até 1000 kPa, valor limite admissível pelos equipamentos.

O tensiômetro de equivalência no tanque C EQ2-C15 comportou-se similarmente ao outros equitensiômetros, medindo valores até 1000 kPa, contrariamente às medidas de Mendes (2000) que não atingiram este valor.

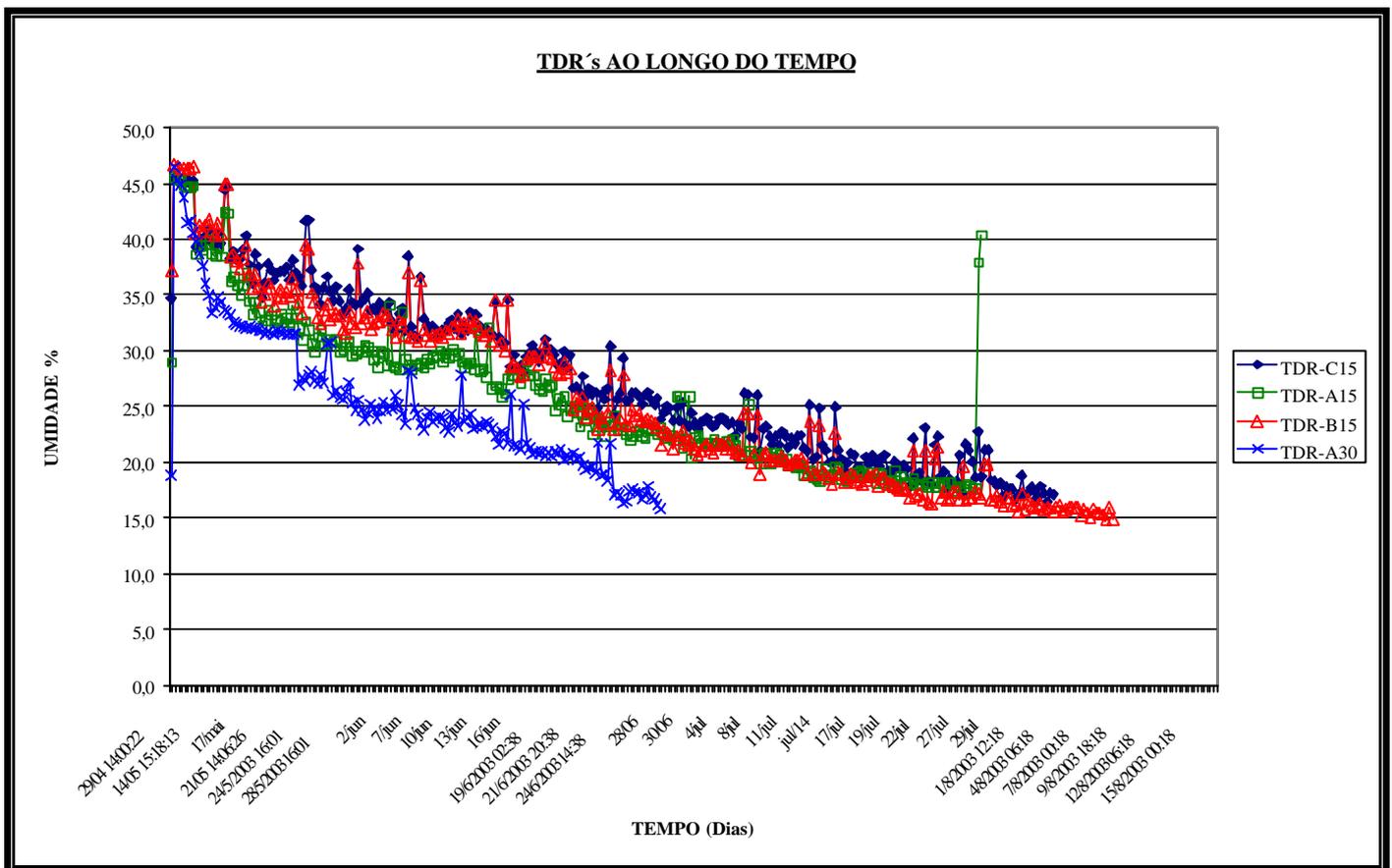


Figura 7.8: - Correlação dos dados coletados pelos TDRs.

O Figura 7.8 apresenta o desempenho dos TDRs durante os ensaios. Observa-se uma decalagem nítida entre os valores de umidade no tanque A, nas profundidades de

15 e 30 cm tendo uma diferença média de 5% de umidade. Essa diferença justifica-se pelo fato da presença do geodreno, criando condições de superfície nesta profundidade, portanto retendo menos água de que na profundidade de 15cm.

Os dados mensurados pelas sondas TDRs durante os ensaios após a saturação e drenagem, e nos períodos posteriores, foram bastante satisfatórios (Figura 7.8), essencialmente, quando comparados aos dados obtidos pela curva característica do solo in-situ (Figura 7.20; Tabela 7.13), alcançando valores de umidade na faixa de 35 a 45% . Não foram medidos os valores de umidade de saturação por causa de perturbações nas ligações com a unidade de captação de dados (data-logger), mas pode-se estimar este valor na ordem de 50 a 60% de umidade partindo dos valores mensurados imediatamente após a drenagem inicial e dos valores da curva característica do solo (Figura 7.20).

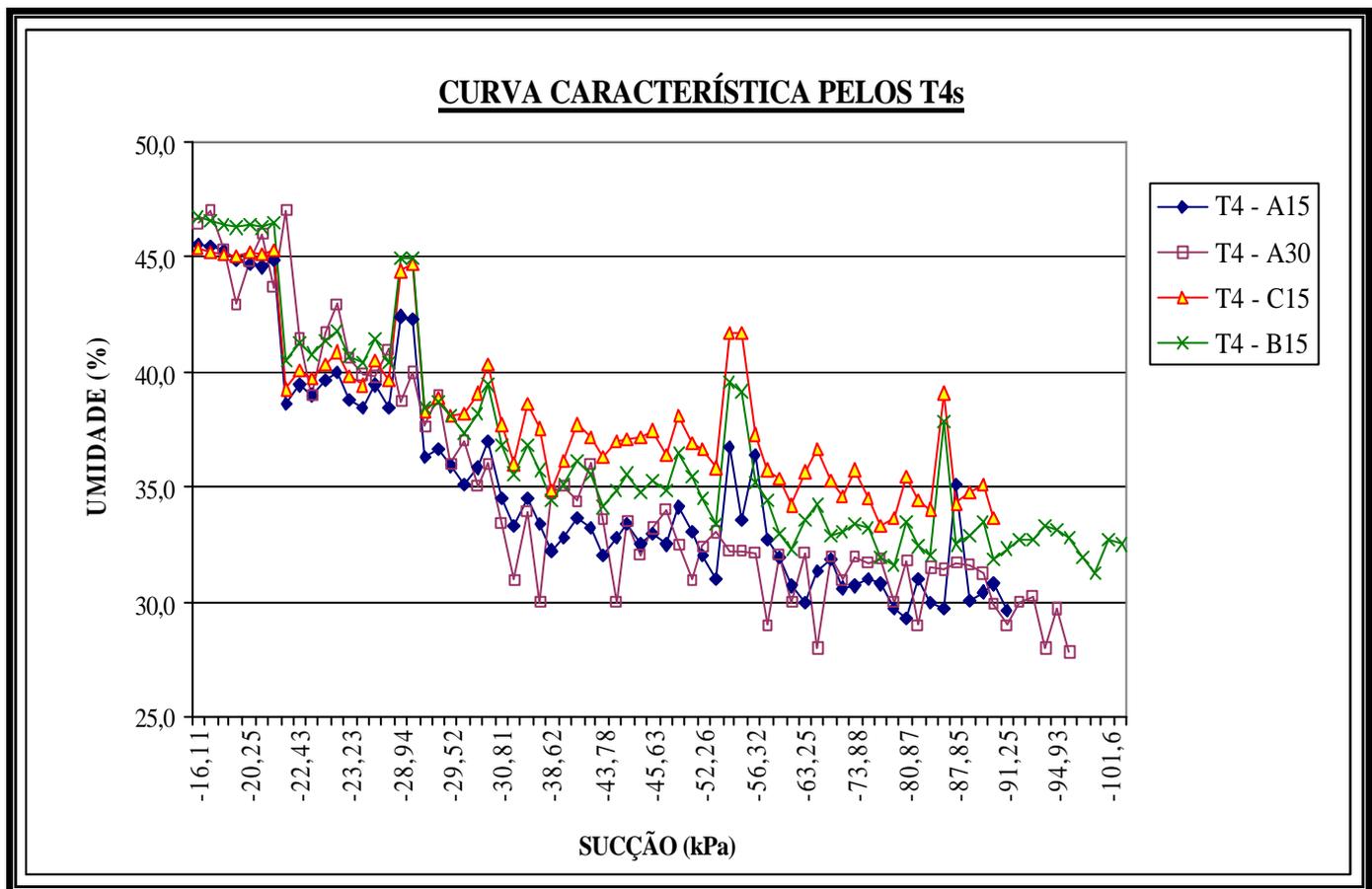


Figura 7.9: - Aspecto da curva característica de retenção de umidade a partir dos dados do tensiômetros automatizados.

A Figura 7.9 representa uma correlação dos dados medidos pelos tensiômetros T4.

Os resultados apresentados pelos tensiômetros automatizados T4 foram suficientemente representativos, pois apresentaram uma boa resposta, mensurando sucções matriciais (Ψ_m) até aproximadamente 100 kPa, em valores de umidades no intervalo de ± 30 a 33%. Não foram levados em consideração valores medidos acima de 100 kPa pelo fato de ter atingido o valor máximo de medição dos equipamentos. O T4-A30 mensurou a rápida drenagem da água na profundidade de 30cm. Este fato justificado pela presença de geodreno acelerando a secagem do solo.

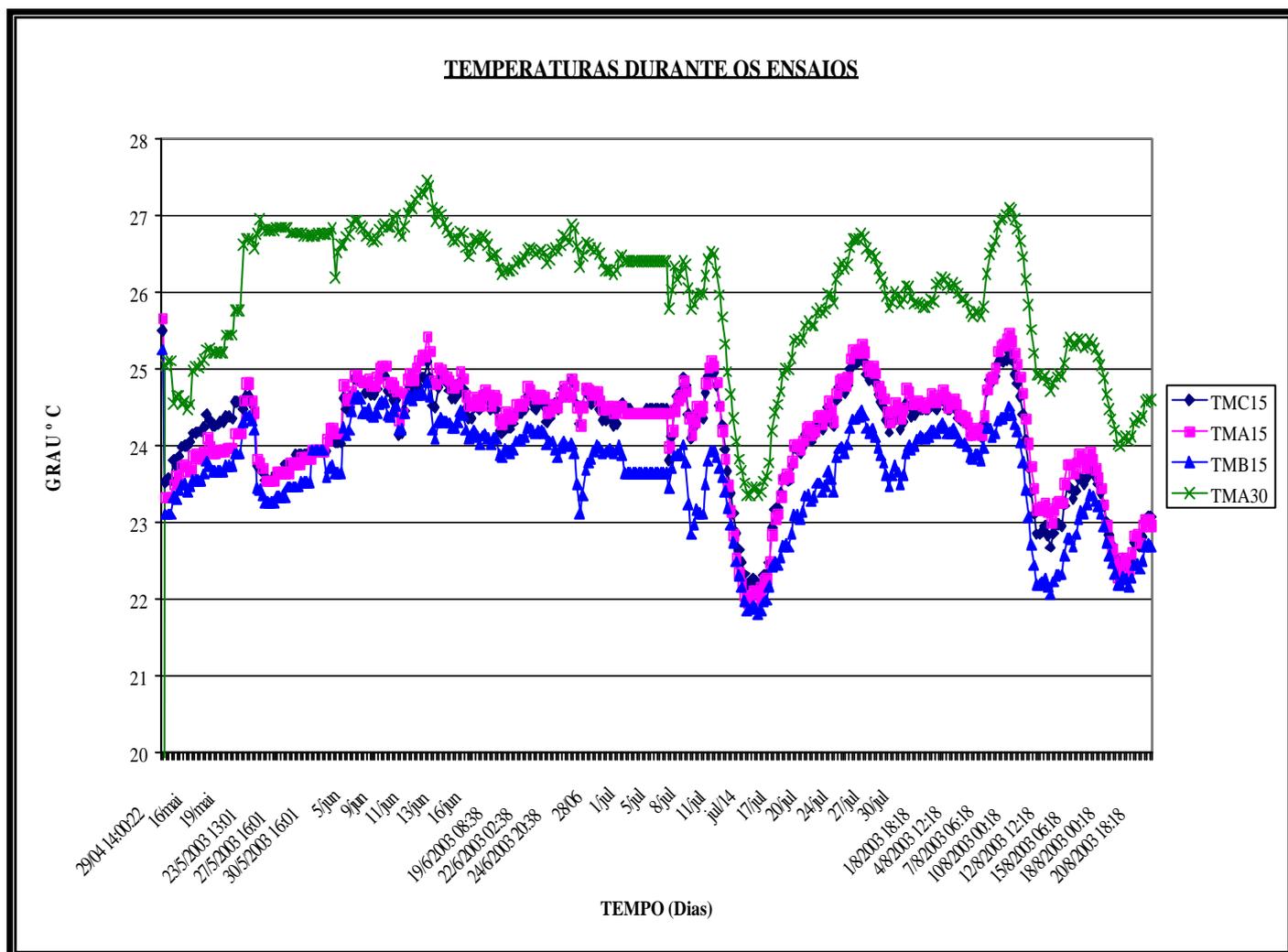


Figura 7.10: - Correlação dos dados coletados pelos geotermômetros.

Os dados obtidos pelo geotermômetro (Figura 7.10) não foram significativos a ponto de comprometerem o comportamento do tensiômetro automatizado, pois não atingiram valores superiores à 50°C que poderiam comprometer o desempenho dos equipamentos (LOVERY et al, 1999). Uma similaridade das temperaturas nos solos à profundidade de 15cm foi detectada, com uma ligeira diminuição da mesma no tanque B. A temperatura na profundidade de 30cm no tanque A é bastante similar à

temperatura ambiente como se pode comparar com os dados obtidos pelos termômetros (Figura 7.11) instalado próximo aos mini-lisímetros, e demonstra a transposição das condições de superfície nesta profundidade.

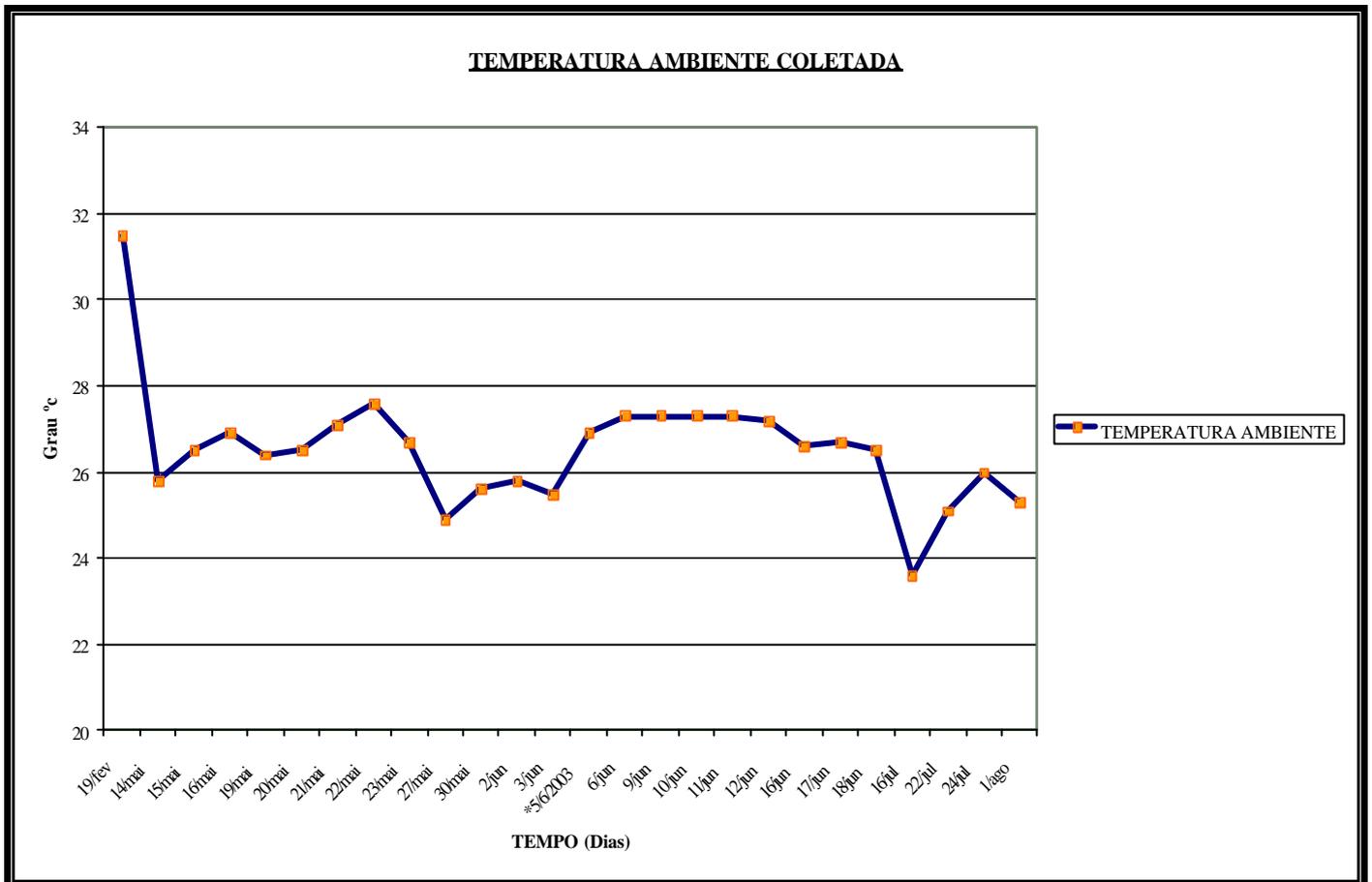


Figura 7.11: - Correlação dos dados coletados pelos termômetros.

As diferenças de temperatura entre o ambiente e o solo ficaram em torno de $\pm 2^{\circ}\text{C}$. O termômetro assim como os geotermômetros registraram temperaturas sem muita variação pelo fato da ausência de radiação solar que poderia provocar altas mudanças de temperatura durante o dia. As temperaturas no solo, no entanto, variam com a do ar ambiente; e a troca de calor somente ocorre entre o solo e este último.

Portanto, não foi detectada qualquer influência da variação de temperatura na mensuração de sucção pelos tensiômetros e equitensiômetros durante o decorrer do ensaio.

Os resultados das medições de sucção pelo método papel filtro apresentadas nas Tabelas 7.6 e 7.7 foram significativos quando comparados com valores obtidos com os demais instrumentos.

Este fato não se concretizou com os valores determinados pelo método do papel-filtro para determinação de sucção total, apenas na data do dia 18/06/2003. Estas discrepâncias podem ser explicadas pelo tempo empregado equalização do equilíbrio entre solo / papel-filtro (uma semana). Quando se aumentou o tempo de equalização, os valores obtidos foram bastante próximos aos dos outros equipamentos.

O uso de técnicas diversas para determinação de sucção e as correlações dos dados coletados são primordiais para o controle da acurácia dos valores de sucção reais no solo.

A determinação de umidade gravimétrica é destrutiva e sugere uma grande quantidade de amostragem, para se poder representar o perfil da variação de umidade em relação à profundidade e tempo. Os resultados obtidos nestas coletas comprovam a indicação das diferenças entre o avanço da frente de umidade do tanque A e o do tanque B. O tanque A apresenta condições de umidade na profundidade de 30cm, similares à da superfície, fato provocado pela presença do geodreno. Esta ocorrência não se determinou no tanque B, onde se vê um aumento da umidade em relação à profundidade.

A correlação das umidades volumétricas calculadas a partir dos valores de umidades gravimétricas Tabela 7.8 com os valores de umidade dos TDRs Tabela 7.1 indica homogeneidade e comprova a validade e exatidão das medições pelos TDRs.

Tabela 7.1: - Dados de umidade volumétrica medidos pelos TDRs na data do 10/06/2003.

Data		TDR-C15		TDR-A15		TDR-B15		TDR-A30	
		mv	%	mv	%	mv	%	mv	%
10/jun	05:28:40	922	31,5	860	28,7	922	31,5	758	24,1
10/jun	11:28:40	930	31,9	864	28,9	916	31,3	756	24,0
10/jun	14:28:40	927	31,8	858	28,6	929	31,8	736	23,1

7.3 - Desempenho dos lisímetros e controle de drenagem.

Para o monitoramento das condições físicas nos solos ensaiadas e analisadas com o auxílio dos lisímetros, partindo da equação do balanço hídrico (Equação 6.1), pode-se determinar a Evaporação ocorrida no bloco de solo.

$$ET = I - D \pm \Delta w \quad (7.1)$$

Como não há transpiração pela ausência de vegetação foi considerada estritamente a evaporação.

A partir da equação geral ($P + I \pm R_o = ET + D \pm \Delta w$)

Obtem-se:

$$ET = I - D \pm \Delta w \quad (7.2)$$

Destes dados coletados determina-se o tempo de evaporação e a quantidade de água evaporada. Embora as variações de umidade determinadas sejam pontuais, pode-se considerar os valores medidos por extrapolação de modo que as umidades medidas tanto pelo método do TDR como gravimétrico, indicam uma redução da umidade maior no tanque A do que no tanque B, na profundidade de 30 cm. Na profundidade a 15 cm, houve uma similaridade destes valores. Este fato ocorreu devido a introdução do Geodreno no bloco de solo do tanque A.

O Geodreno proporcionou condições atmosféricas em todos os níveis de profundidade do solo, situação essa que conferiu ao solo um comportamento igual às condições de superfície, facilitando a drenagem, acelerando o aumento da sucção. O fator que determinou este fenômeno foi a troca de ar do bloco de solo com a atmosfera. O deslocamento de ar no solo ocorre por fenômeno difusivo provocado pelos gradientes

de concentração no solo, no interior do lisímetro e por convecção na superfície, decorrente da movimentação de ar provida de um ventilador, instalado no laboratório. Esta ventilação provocou uma aceleração no processo de secagem do solo, suficiente para aumentar o processo de convecção na superfície do bloco de solo, somente provocado pela ação do vento, partindo do fato que não há grande efeito de temperatura nem mudança de pressão barométrica. Além disso, pode-se minimizar qualquer transporte, pelo movimento de água, de gás dissolvido, bem como qualquer oscilação do lençol. Conseqüentemente, ocorreu um gradiente de evaporação no solo, entre o interior e exterior do tanque, facilitando a saída de vapor de água através do Geodreno. Deve-se considerar também, que o Geodreno facilitou o fluxo de água no solo.

Neste caso particular a taxa de evaporação (ΔE), é diretamente proporcional à variação de umidade volumétrica, considerando que os volumes de água drenado e irrigado são constantes.

CAPÍTULO 8: - CONCLUSOES E RECOMENDACOES

8.1. Conclusões

O estudo apresentado nesta dissertação tratou principalmente do desenvolvimento de novos tensiômetros para a determinação de sucções elevadas. Usaram-se outros instrumentos como ferramentas de aferição dos resultados medidos pelos novos tensiômetros. Os equipamentos foram testados em lisímetros de laboratório desenvolvidos especificamente para esta pesquisa, permitindo o estudo do avanço da frente de saturação através do solo ensaiado, na presença de um dispositivo de aeração e de aceleração da drenagem.

Os resultados alcançados pelos tensiômetros foram satisfatórios além de atender perfeitamente as expectativas iniciais da pesquisa, que era medir sucções elevadas. A meta atingida, com o sustento de altas sucções durante dias, comprovou o bom funcionamento dos equipamentos. O sistema de saturação das pedras dos tensiômetros mostrou-se bastante eficaz, não necessitando de altas pré-pressões aplicadas às mesmas para inibir núcleos de cavitação.

Observou-se que quanto menor o volume do reservatório de água do tensiômetro, melhor este sustentará altas pressões negativas em tempo maior. Fato justificado provavelmente pela minimização das fontes de núcleo de cavitação, além da redução da área de adesão água-material, fazendo prevalecer a atuação das forças coesivas da água.

Quanto menor a permeabilidade das pedras porosas maior a capacidade do tensiômetro de medir altas sucções, conforme esperado.

Os tensiômetros construídos com transdutores ENTRAN forneceram respostas mais rápidas do que os da ASHCROFT.

Os valores máximos medidos pelo TENSE-EPXO 1, construído com uma pedra porosa de 500 kPa. atingiram valores maiores que o valor máximo de pressão de entrada de ar da pedra porosa. Tal fato se explica por um provável valor de entrada de ar da pedra porosa superior ao indicado na mesma pelo fabricante.

O uso do dreno para aeração do solo no lisímetro A acelerou a secagem do mesmo, favorecendo a simulação de ciclos de molhagem e secagem do sistema em um menor período de tempo.

O papel filtro mostrou-se uma boa alternativa para aferição dos valores sendo que as duas técnicas empregadas, medindo sucção total e matricial mostraram-se bastante adequadas.

Os valores de sucção alcançados no tanque C neste trabalho, com o solo areno-argiloso de Seropédica foram superiores aos medidos por Mendes (2000), porque o tempo de secagem foi mais longo, permitindo atingir valores de sucções superiores.

8.2. Recomendações da pesquisas futuras

Dentre as diversas possibilidades de pesquisas que poderão ter prosseguimento com relação ao desenvolvido neste trabalho pode-se citar:

1. Aprofundamento no desenvolvimento dos tensiômetros, especificando melhores os aspectos relativos a tipos de pedras porosas, dimensões das mesmas, forma, etc;
2. Aprofundamento no desenvolvimento dos tensiômetros variando mais os transdutores empregados;
3. Estudo do balanço hídrico do sistema, considerando ainda a possibilidade de modelagem do fluxo, apoiado nas medições “in-situ” realizadas;
4. Estudo com os mesmos dois lisímetros, mas com o mesmo solo em ambos e um dreno colocado longitudinalmente e saída próxima às torneiras, controle da entrada e saída de água no sistema;
5. Ainda nos mesmos lisímetros fazer os ensaios colocando células de carga na base destes para medir o peso real do conjunto solo e água e suas variações;
6. Efetuar o estudo colocando uma vegetação gramínea em um dos lisímetros para observar seu efeito no ciclo hidrológico do solo;
7. Desenvolver e colocar equipamentos, TDRs para medida de contaminação do solo e avanço da pluma de contaminação, realizando os ensaios para verificação deste avanço e seu efeito e interação com o solo.

CAPÍTULO 9: - REFERÊNCIAS

- ALIMI ICHOLA I., 1998. "Use of Time Domain Reflectometry probes for monitoring unsaturated soil" *pollution Proc. of 3 Int. Cong. On Environmental Geotechnics*, Lisboa, Portugal 7-11 págs. 107-112.
- ALIMI ICHOLA, 1999. "Soil pollution characterization during infiltration test". *R.N. Yong & H.R. Thomas Eds., Proceedings of 2º Conference organized by BGS., Geoenvironmental Engineering*, London, pp. 201-208.
- AL-KHAFRAF, S. & HANKS, R. J., 1974. "Evaluation of the filter paper method for estimating soil water potential". *Soil Science* 117(4): 194-199.
- ALSHIHABI O., SHAHROUR I. & MIEUSSENS C., 2002. «Experimental study of the influence of suction and drying / wetting cycles on the compressibility of a compacted soil». *Unsaturated soils, Jucá, de Campos & Marinho eds.* Págs 541-545.
- ASHCROFT, 1999 Pressure transmitter instruction sheet. www.dresserinstruments.com
- ASHCROFT, 2000. Model K2 pressure transducer. www.dresserinstruments.com
- AUBERTIN, M., RICARD, J.F. & CHAPUIS, R.P., 1998. "A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines". *Canadian Geot. Jour.* 35: pp 55-69.
- AUZET A. V., BOUCHTI J.P., SANCHEZ-PEREZ J.M. et GUTH G., 1996. "Mesure de l'humidité des sols à différentes profondeurs au moyen d'une sonde tube TDR: intercomparaison avec les sondes neutroniques". *Atelier Instr. et Exp., Toulouse, METRO-FRANCE – INSU, E*, Vol. dès resumes étendus, p 6.
- BACHE, D.H. and MAC ASKILL I.A. 1984. "Vegetation in Civil and Landscape Engineering" .*Granada Publishing Ltd.*, London, England.
- BADILLO, E. J. & RODRIGUES, A. R. 1981. *Mecánica de Suelos, Tomos I, II, III*, México.

- BAVER, L. D.; GARDNER, W. H., 1972. *Física del suelo*. México: Hispano Americano, 529 p.
- BENTOUMI, O., 1995. *Transfert par Infiltration de l'eau dans les sols compactés non saturés. Etude de la diffusité et de la conductivité hydraulique*. These, INSA-Lyon, 202pags.
- BEZERRA, R. L., 1996 *Desenvolvimento do piezocone COPPE da terceira geração e sua utilização em argilas moles*. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil
- BOCKING, K.A. and FREDLUND, D.G., 1980. "Limitations of the axis translation technique". *Proc. Of 4th Int. Conf. On expansive Soils, Denver, Colorado*, Vol. 1, págs. 117-135.
- BOUYOUCOS, G.J. & MICK, A.H.,1940, " Comparison of absorbent materials employed in the electrical resistance method of making a continuous measurement of soil moisture under field conditions". *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, vol.5, pp 77-79.
- BRADY, N. C., 1989. *Natureza e propriedades do solo*. Tradução, Antônio B. N. Figueredi, 7º ed., Rio de Janeiro.
- BROOKS, R.H. & COREY, A.T., 1966. "Properties of porous media affecting fluid flow". *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Eng.*, vol.72 (IR2), pags. 61-68.
- BROOKS, R.H. & COREY, A.T., 1964. *Hydraulic properties of porous media*. Fort Collins, Colorado State Universty, 27pags.
- BRUCE, R.R et KLUTE, ^a, 1956. "The measurement of soil diffusivity". *Soil Sci. Soc.Am. Proc.*, vol. 20, pgs. 458-452.
- BUENO W.A & DEGREVE, L., 1980. *Manual de laboratório físico-químico*. Sao Paulo, McGraw Hill do Brasil, pp.177.
- BUTTERS, G. L. & CARDON, G. E., 1998 "Temperature Effects on Air-Pocket Tensiometers". In: *Soil Science*, vol. 163(9), pp. 677 - 685.

- BULUT R., LYTTON R.L., and WRAY W.K., 2001. "Soil Suction Measurements by Filter Paper, in Expansive Clay Soils and Vegetative Influence on Shallow Foundations". *Geotechnical Special Publication No. 115* (ed. C. Vipulanandan, M. B. Addison and M. Hasen), Reston: American Society of Civil Engineers, pp. 243-279.
- BULUT, R., PARK, S.W. & LYTTON, R.L., 2000. "Comparison of Total Suction Values from Psychrometer and Filter Paper". *Unsaturated Soils for Ásia*, págs. 269-272.
- BULUT, R., PARK, S.W. & LYTTON, R.L., 2000. A "New Matric Suction Calibration Curve". *Unsaturated Soils for Ásia*, págs. 263-267.
- CAMAPUM, J.C et PEREIRA, J.H.F., 2002. "Une Approche Pour la Description des Propriétés des Sols non Saturés ». *Unsaturated Soils*, págs. 501-505.
- CAMAPUM J., GUIMARÃES R. C. & FEITOSA PEREIRA J. H., 2002 "Courbe de retention d'eau d'un profil d'alteration". *Unsaturated soils*, págs. 289-294.
- CAMPBELL, C. G.; GHODRATI, M. & GARRIDO, F., 1999 "Comparison of the Domain Reflectometry, Fiber Optic Mini-Probes and Solution Samplers for Real time Measurement of Solute of Solute Transport in Soil". In: *Soil Science*, vol. 164(3), pp. 156 - 170.
- CAMPBELL, R. J., 1974. "A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data". *Soil Sci.* Vol. 117, pags. 311-314.
- CAMPOS, M. P., 1994 "Equipamentos e técnicas para a determinação da sucção no campo". In: *Simpósio sobre solos não saturados, 2, pp.9-18, Recife*.
- CAMPOS, R.M.P., 1992. "Medidas de Sucção em corpos de Prova Compactados Estaticamente em Laboratório Utilizando Tensiômetro". *Solos e Rochas, 15*, (1): págs. 29-34.
- CARNEIRO, B. J. I. & CONCIANI, W., 1997 "Emprego do TDR para Acompanhar a Evolução da Infiltração de Água no Solo". In: *Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados/ ÑSAT'97, 3, Rio de Janeiro, Ed. Abril, pp. 215-220*.

- CHANDLER R.J. & GUTIERREZ C.I., 1986 «The filter-paper method of suction measurement». *Geotechnique*, vol. 36, pp. 265-268.
- CHAVES, H. M. L. SILVA, P. A. & CARLOS, R. J., 1995 “Aplicação da USLE e S.G.I. na predição da erosão atual e potencial a nível regional: o caso do vale de S. Francisco”. In: *Congresso Brasileiro de ciência do solo*, XXV, vol. 4, pp.161 - 163, Viçosa.
- CHILD, E. C. et COLLIS-GEORGE, N., 1948. “Interaction of water and porous materials”. *Soil geometry and soil water equilibria*, nº3, pags. 78-85.
- COELHO NETTO, A. L., 1994 “Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia”. In : *Geomorfologia: Uma atualização de bases e conceitos*, capítulo 3, pp.93 - 198, Rio de Janeiro.
- COSTA, Y. D. J. & CINTRA J. C. A. , 2001 “ Aplicação da técnica de Reflectometria no Domínio do tempo em Provas de Carga em Placa”. *4º Symp. Solos não saturados*, Porto Alegre, págs. 259-275.
- CÔTÉ, J. KONRAD, J. M. & ROY, M., 2002. “Influence of Grain Size Distribution and Mineralogy of Unbound Aggregates on Soil-Water Characteristic Curves”. *Unsaturated Soils*, págs. 255-260.
- COUCHAT P., 1977. “Methodological and technical aspect of the nêutron method for measuring soil moisture content”. *Annales Agronomiques*, vol. 28, pags. 477-488.
- 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.
- CULLEY J. L. B., 1993. “Density and compressibility”. Chap. 50, In: *Carter M. R.. Soil sampling and method of analysis*. Boca Raton: Carter M. R..
- CRUZ, P. T., 1994 “Pressões efetivas e sucção em solos não saturados de origem residual”. In: *Simpósio sobre solos não saturados*, 2º, Recife, pp.153 - 166.

- 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. & VAN GENUCHTEN, M. T., 1986. "The time Domain Reflectometry Method for Measuring Soil Water Content and Salinity". *Geoderma*, vol. 38, pags. 237-250.
- DANI OR, TULLER, M., 2002. "Cavitation During Desaturation of Porous Media Under Tension". *Water Resources Research*, vol. 38, n. 5.
- DANIEL, D. E., 1982. "Measuerement of hydraulic conductivity of unsaturated soils with thermpcouple psychrometers". *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, vol. 46, pags. 1125-1129.
- DANZIGER, F. A. B., 1990 *Desenvolvimento de equipamento para realização de ensaio de piezocone: Aplicação a argilas moles*. Tese D. Sc., COPPE/UFRJ.
- DAYLAC, R., 1994 *Desenvolvimento e utilização de uma célula para medições de K_0 com controle de sucção*. Tese M. Sc., Dep. Eng. Civil, PUC/RJ.
- DE GENNARO, V., CUI, Y. J., DELAGE, P. & DE LAURE E., 2002. "On the use of high air entry value porous Stones for suction control and related problems" *Unsaturated soils, Jucá, de Campos & Marinho eds*. Págs 435-440.
- DELAGE, P., SURAI de SILVA G. PR and VICOL T, 1992. "Suction controlled testing of non saturated soils with osmotic consolidometer, *7th Int. Conf. Exp. Soils*, Dallas, pp. 206-211.
- DELTA-T DEVICES, 2000. *Instruments for Environmental and Industrial Measurement*, Instruções do fabricante, <http://www.delta-t.co.uk>
- ECHING, S. O. & HOPMANS, J. W., 1993. "Optimization of function from transient out flow and soil water pressur data". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 57, pags. 1167-1175.

- ELRICK, D. E., ROBIN M.J., et LARYEA K. B., 1983. "Hydrodynamic dispersion during absorption of water by soil. 1. Model soil-moisture profiles". *J. Hydrol.*, vol. 65, pags. 313-331.
- ENTRAN[®] PRESSURE SENSORS, 2000 *EPX Miniature Threaded Pressure Sensors*.
www.entran.com
- FELLNER-FELDEGG H. 1969. "The measurements of dielectrics in the time domain". *Journal of Physical Chemistry* 73: pp. 616-623.
- FARREL, D.A. & LARSSON, W.E., 1972. "Modeling the pore structure of porous media". *Water Resources Research* 3: 699-706.
- FAWCETT R.G. and COLLIS-GEORGE N., 1967. "A filter-paper method for determining the soil moisture characteristics of soil". *Australian Journal Exp. Agr. And Animal Husbandry*, vol. 7, pp. 162-167.
- 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 medição de poro pressões em encostas não-saturadas*. Tese de Mestrado PUC-RIO, Rio de Janeiro, RJ.
- FLEMING, P. M., CAMPOS, T. M. P., & VARGAS JÚNIOR, E. A. 1994 "Medida de sucção em encostas não saturadas através de tensiômetros automatizados". In: *Simpósio sobre solos não saturados, 2, pp.79-88, Recife*.
- FREDLUND, D. G., 1979. "Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. *Can. Geotech. J.*, 16, n^o1, pags. 121-139.
- FREDLUND, D. G., MORGENSTERN N. R. & WIDGER R. A., 1978. "The shear strength of unsaturated soils". *Canadian geotechnical Journal*. 15, n^o3 , pags. 313-321.

- FREDLUND, D. G., & RAHARDJO, H., 1993 “Soil mechanics for unsaturated soils”.
Wiley-Interscience Publications.
- FREDLUND, D.G., SHUAI, F. & FRENG, M., 2000. “Use of a New Thermal
Conductivity Sensor for Laboratory Suction Measurement”. *Unsaturated Soils
for Ásia*, págs. 275-280.
- FREDLUND, D.G. & XING, A., 1994. “Equation for soil-water characteristic curve.”
Canadian Geotechnical Journal 37: 521-532.
- FREDLUND, D. G., XING, A., FREDLUND, M. D. and BARBOUR S. L., 1996. “ The
relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water
characteristics curve”. *Can. Geot. J.*, 33, pags. 440-448.
- FUTAI, M M., 1997. *Análise de ensaios endométricos com sucção controlada em
solos colapsíveis*. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- GAIDI, L., et ALIM I., 2000. “études dès caracteristiques hydrodynamique dos sols par
la methode TDR(Time Domain Reflectometry)”. *Bulletin of Engineering
Geology and the Environment*, vol. 59 n°3, pags. 247-255.
- GARBULEWSKI, K. & ZAKOWICZ, S., 1995 “Suction as an indicator of soil
expansive potential”. In: *First International Conference on Unsaturades Soils /
Unsat’95*, vol.2, pp. 593 - 599, Paris.
- GARDNER, R., 1937 “A method of measuring the capillary tension of soil moisture
over a wide moisture range” In: *Soil Science*, vol. 43, jan-jun, 277-283.
- GARDNER W. R., 1958. “some steady state solutions of unsaturated moisture flow
equation with application to evaporation from a water table”. *Soil Sci.*, vol. 85,,
pags. 228-232.
- GERSCOVICH, D.M.S., 1994. “*Modelagem numérica de fluxo em meios porosos
saturados e não saturados com aplicações ao estudo de encostas no Rio de Já
neiro*”. Tese Dsc- PUC-RIO.
- GERSCOVICH, D.M.S., 2001. “Equação para Modelagem da Curva Característica
Aplicada a Solos Brasileiros”. ”4º Symp. Solos não saturados, Porto Alegre,
págs. 77-92.

- GERSCOVICH D.M.S. & SAYÃO A.S.F.J.,2002. "Evaluation of the soil-water characteristic curve equations for soils from Brazil". *Unsaturated soils, Jucá, de Campos & Marinho eds.* págs.295-300.
- GHOSH R.K., 1980. "Estimation of soil moisture characteristic from mechanical properties of soils". *Soil Sci. Journal*, vol. 130, nº2, pp. 60-63
- GOURLEY, C. S. & SCHEIRNER, H. D., 1995 "Field measurement of soil suction". In: *First International Conference on Unsaturated Soils / Unsat'95*, vol.2, pp. 601-607, Paris.
- GREACEN, E.L., WALKER, G.R., and COOK, P.G., 1987. "Evaluation of the filter paper method for measuring soil water suction". *International Conference on Measurement of soil and plant water status*, pp. 137-143.
- GREEN, W.H. & AMPT, G.A., 1911. "studies on soil physics: 1. The flow of air and water through soils". *J. Agric. Sci.*, Vol. 4, pags. 1-24.
- GUAN, Y. & FREDLUND, D. G., 1997 "Direct measurement of high soil suction". In: *Simpósio solos não saturados brasileiro, 3*, vol.2, pp. 543-550, Rio de Janeiro.
- HANSEN, E A, 1975, "validity of soil water samples collected with porous ceramic cups". *Soil sci. Soc. Am. Proc.* 39, 528-536.
- HARISON, B.A & BLIGHT, G.E., 2000. A "Comparison of in-situ Suction Measurements." *Unsaturated Soils for Ásia*, págs. 281-285.
- HAVERKAMP, R.D.G & PARLANGE, J.Y., 1986. " Predicting the water-retention curve from particle size distribution. Sandy soils without organic matter". *Soil Sci.* 142(6): 325-339.
- HANSEN, H.C., 1926. "The water-retaining power of the soil". *Journal of Ecology*, Vol.14, pp.92-111.
- HAYWOOD, M.,1980 "Changes in Land Use and Vegetation in the Sudano-Sahelian Project Zone". ILCA Working Document 3, Addis Ababa,Ethiopia.

- HARVEY, E.N., BARNES, D.K. , McELROY, W.D., WHITELEY, A.H., PEASE, D.C., and COOPER, K.W., 1944. "Bubble formation in animals. I, Physical factors". *J. Cell. and Comp. Physiol.*, 24, No. 1, 1--22.
- HECK, B.; HOHENSTEIN, N. & SCHRÖDER, D. 1994. „Verfahren zur dichteunabhängigen kapazitiven On-line-Messung des Wassergehaltes fester Stoffe“. - *Techn. Messen*, 61: 421-428.
- 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.
- HÉNIN, S.; GRAS, R.; MONNIER, G., 1976 *O solos agrícolas*. São Paulo, ed. da Universidade de São Paulo.
- HILLEL, D., 1971. *Soil and Water: Physical principles and processes*. Academic press.
- HOLDEN, J. C. & TRUONG, H.V.P., 1995 "Soil suction in embankments of expansive clay". In: *First International Conference on Unsaturated Soils/ Unsat'95*, vol.2, pp. 609 - 614, Paris.
- HOPKINS, W. G., 1995. *Introduction to plant physiology*. New York, John Wiley & Sons, 464 p.
- HOPMANS, J.W., SIMUNEK J. and BRISTOW K.L. 2002. "Indirect estimation of soil thermal properties and water flux using heat pulse probe measurements: Geometry and dispersion effects". *Water Resources Research* 38(1): 1-14.
- HORTON, R. E., 1933 *The role of infiltration in the hydrological cycle*. *Trans. Am. Geophys. Union*, 14, 446 – 460.
- KACHANOSKI, R. G., PRINGLE E. & WARD A. L., 1992. "Field measurement of solute travel times using time domain reflectometry". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 56, pags. 47-52.
- KLUTE, A., 1952. "A numerical method for solving the flow equation for water in unsaturated materials". *Soil Sci.*, vol. 86, pags. 251-253.

- KÖNIG, D., JESSBERGER, H.L., BOLTON, M.D., PHILLIPS, R., BAGGE, G., RENZI, R., and GARNIER, J., 1994. "Pore pressure measurement during centrifuge model test: experience of five laboratories, In: *Leung, Lee, and Tan (eds), centrifuge '94'* 101-108, Rotterdam: Balkema.
- KRAMER, P.J. and BOYER, J.S. 1995. "Water Relations of Plants and Soils". *Academic Press*: San Diego. 495 pp.
- KUMAR PHANI, B.R & SHARMA, 2002. "A Review of in Situ Properties of Unsaturated Soils With Reference to Suction". *Unsaturated Soils*, págs. 351-355.
- LACERDA, W. A., MAHLER, C.F. & FERREIRA, S. R. M., 1997 "Ensaio de campo para determinação das propriedades de solos não saturados", In: *Simpósio Brasileiro de Solo não Saturados*, 3, vol.2, pp. 398 - 415, Rio de Janeiro.
- LALOU, L. , VULLIET L., & GRUAZ G., 1995 "Influence of suction on the mechanical behaviour of sandy silt". *Unsaturated soils*, Editors E. E. Alonso & Delage A. A., Balkema & Presses ENPC. Págs 133-138, Vol 1.
- LAROUSSE, C. et DE BACKER L., 1975. «Physical interpretation of the diffusion equation parameters according to MARKOV's stochastic processes theory». *Soil Sci. Am. Proc.*, vol. 120, págs. 169-173.
- LEE, H. C. & WRAY, W. K., 1995 "Techniques to evaluate soil suction – A vital unsaturated soil water variable". In: *First International Conference on Unsaturated Soils/ Unsat'95*, vol.2, pp. 615 - 622, Paris.
- LEITE LOPES, JOSE & TIOMNO, JAIME., 1961. *Física na escola secundária*. Revista Brasileira de Estudos Pedagógicos, Rio de Janeiro, v.33, n.76, p.239-246.
- LEONG E.C. & RAHARDJO H., 2002. "Soil-water characteristic curves of compacted residual soils". *Unsaturated soils*, Jucá, de Campos & Marinho eds. Págs. 271-276.

- LEONG EC, He L, RAHARDJO H., 2002. "Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements". *Geotechnical Testing Journal*, 25(3): P. 321-332.
- LEWIS, M.R. et MILNE, W. E., 1938. « Analysis of border irrigation ». *Agric. Eng.*, Vol. 19, pags. 267-272.
- LIBARDI, P. L., 1995 *Dinâmica da água no solo*. Ed. ESALQ/USP, Piracicaba, São Paulo.
- LOGSDON, S.D. & LAYNES, S.D., 1993. "Methodology for determining hydraulic conductivity with tension infiltrometers". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol 57, pags. 1426-1431.
- 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.
- MACHADO, S.L, DOURADO, K.A., 1998. "Novas Técnicas Para Obtenção da Curva Característica de Sucção do Solo". págs. 325-335.
- MAHLER, C. F., 2001. *Notas de aulas*, Mecânica dos Solos não Saturados, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ.
- 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: *Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados*, 3, vol.1, pp. 254 - 266 Rio de Janeiro.
- MAHLER C.F., DE OLIVEIRA L.C.D., 1998. "Measurement of matrix and total in situ suction of porous soils of Sao Paulo using the filter paper method". *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Unsaturated Soils*, 1: 402-409.
- MAHLER, C.F., MENDES C.A.R., SOUZA A.P. & FERNANDES N. F., 2002. "Measuring the matrix potential of water in the soil through instrumentation installed in mini-lysimeters". *Unsaturated soils, Jucá, de Campos & Marinho eds*. Pags. 331-334.

- MAISON, P., 2000. *Un modele Hydrologique de suivi da la pollution diffuse en basin versant. Une approche mecaniste simplifiée da la zone non saturée*. These de DEA de L'Institut national Polytechnique de Toulouse, nº1653 (246 pages).
- MALLANTS D., M. VANCLOOSTER, M. MEDDAHI AND J. FEYEN, 1994. «Estimating solute transport in undisturbed soil columns using time domain reflectometry». *Journal of contaminant hydrology*, vol.17 , pags. 91-109.
- MARINHO, F. A. M., 1994. *Shrinkage Behaviour of some plastic Soils*. Tese de Doutorado, University of London, UL, London, Inglaterra
- MARINHO, F. A. M., 1995. “A técnica do papel filtro para medição da sucção”. In: *Encontro sobre Solos não Saturados*, pp. 112-125, Porto Alegre.
- MARINHO, F. A. M., 1996. “Mecânica dos solos não saturados”. *Notas de aula*.
- MARINHO, F. A. M., 1997. “Medição de sucção em solos”. In: *Simpósio Brasileiro de solos não saturados*, 3, pp. 373-397, Rio de Janeiro.
- MARINHO, F. A. M., 1998. *Mecânica dos solos Não saturados*. Postúla de nota de Aula.
- MARINHO, F. A. M. & CHANDLER, R. J., 1995. “Cavitation and the Direct Measurement of Soil Suction”. In: *First International Conference on Unsaturated Soils*, Paris, France, vol. 2, pp. 623-630.
- MARSHALL, T. J. and HOLMES J. W., 1981. *Soil Physics*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- MATHER, K.F., 1964. *The earth beneath us*: New York, Random House, 320 pgs.
- McKEE, C.R. & BUMB, A.C., 1997. “Flow-testing coal bed methane production wells in the presence of water and gas. SPE Formation Evaluation 599-608.
- McQUEEN, I. S. & MILLER, R. F., 1968 “Calibracion and evaluation of a wide-range gravimetric method for measuring moisture stress”. In: *Soil Science*, vol.16, nº 3, 225-231.
- MEDINA, H. P., 1972 “Água no solo”. In: *Elementos de Pedologia*. Capitulo 3, São Paulo: Polígono, Ed. Da Universidade de São Paulo.

- MENDES, C. A. R., 2000 *Mensuração da água no solo através da instrumentação automatizada em mini lisímetros de laboratório para fins de estudos ambientais*. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- MITCHELL, J. K., 1976 “Fundamentals of soil behavior”. *John Wiley & Sons, Inc.*
- MONTEITH JL and OWEN PC 1958. “A thermocouple method for measuring relative humidity in the range 95-100%”, *Journal of Scientific Instruments*, Vol. 35, pp. 443-446.
- MORGAN, R. P. C., 1986 *Soil erosion and conservation*. Longman Group, Inglaterra.
- MUALEM, Y., 1976. «A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media ». *Water Resources Res.*, vol.12, pags. 513-552.
- MUSY A. & SOUTTER M., 1991. *Physique du sol*, Editeur(s) : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 348 pages
- 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.
- PACHECO, A.C., 2001. *Desenvolvimento de um novo tensiômetro para medidas de sucção acima de uma ATM*. Tese de Msc. Coppe-UFRJ. 93pags.
- PECK, A.J. & RABBIDGE R.M., 1966. “Direct measurement of moisture potential technique” In *Proc. Unesco- Neth. Gov. Simp. Water in unsat. Soil*, Paris, France, pp 167-170.

- 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.
- PHILIP, J. R., 1954. "Numerical solution of equation of diffusion type with diffusivity concentration – dependent". *Trans. Faraday Soc.*, vol.51, p. 885-892.
- PHILIP, J. R., 1957a. "The theory of Infiltration: 1 the infiltration equation and its solution". *Soil Sci.*, vol. 83, p 345-357.
- PHILIP, J. R., 1960. "General method of exact solution of the concentration – dependent diffusion equation". *Australian J. Phys.*, vol. 13, p. 1-12.
- PINTO, C. DE S., 2000 *Curso básico de Mecânica dos solos em 16 aulas*. São Paulo: Oficina de Textos.
- POROUS STONE - www.soilmoisture.com
- RACHID, F.B.F., 2002.A "Thermodynamically Consistent Model for Cavitating Flows of Compressible Fluids". *International Journal of Non-Linear Mechanics*, págs. 1-20.
- RAHARDJO H, CHANG M.F. & LIM T.T. "Shear strength and in situ matric suction of a residual soil". In: *First International Conference on Unsaturated Soils/ Unsat'95*, vol.2, pp. 637-643, Paris, 1995.
- RAWLS, W.L & BRAKENSIEK 1989. "In H.J. Morel-Seytoux (ed.), " Estimation of soil water retention and hydraulic properties, unsaturated flow in hydrologic modeling: theory and practice: 275-300. Kluwer Academic Publishers.
- 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*, capítulo 3, pp. 27-69, São Paulo.
- RHOADES, J.D. & J. VAN SCHILFGAARDE, 1976. "An electrical conductivity probe for determining soil salinity". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol.40, p. 647-651.

- RICHARDS, B. G., 1974 “Behavior of unsaturated soils”. In: *Soil mechanics*, ed. I.K. Lee, pp. 112-157.
- RICHARDS, L. A. and W. GARDNER, 1936. “Tensiometer for measuring the capillary tension of soil water”. *J. Am. Soc. Agron.* 28: pp.352-358.
- RIDLEY A. M., 1993 *The measurement of soil moisture suction*. PhD. Thesis University of London, Civil Eng. Department.
- RIDLEY A. M., 1995 “Strength-suction-moisture content relationship for kaolin under normal atmospheric conditions”. In: *First International Conference on Unsaturated Soils/ Unsat'95*, Paris, vol.2, 645-651.
- RIDLEY A. M. & BURLAND J. B., 1993 “A new instrument for measuring soil moisture suction”. In: *Technical Note, Geotechnique*, vol.43, nº 2, 321-324.
- RIDLEY A. M., SHNAID F., SILVA G. F. & BICA, A. V. D., 1997 “In situ suction measurements in a residual soil of Southern Brazil”. In: *Simpósio Brasileiro de solos não saturados*, 3, pp. 543-556, Rio de Janeiro.
- RIJTEMA, P. E., 1965. “An analysis of actual evapotranspiration”. *Wageningen, center for Agricultural Publications and documentation*, 107p.
- ROGER (1935) In FLEMING, P. M. (1993) *Desenvolvimento de um Sistema Tensiométrico Automático para a medição de poro pressões em encostas não saturadas*. Dissertação de mestrado apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em ciências de engenharia civil, Geotecnia, Rio de Janeiro, RJ.
- ROGER, B.C., and HORNBERGER, G.M. 1978. “Empirical equations for some soil hydraulic properties”. *Water Resources Research*. 14: pp.601-604.
- RUSSO, D., 1988. “Determining soil hydraulic properties parameter estimation: On the selection of model for hydraulic properties”. *Water Resources Res.*, vol.24, p.453-459.
- SCHREINER, H.D, 1988. *Volume change of compacted highly plastic African Calys*. Ph.d. thesis Imperial College, Universty of London.

- SCHMUGGE, T. J., JACKSON T. J. et McKIM H.L., 1980. "Survey of methods for soil moisture determination". *Water Resource. Res.*, vol. 16, n°6, p. 961-979.
- SHOUSE, P. J., BISSON, J.B., ELLSWORTH T.R. & JOBES J. A., 1992. "Estimating in situ unsaturated hydraulic properties of vertically heterogeneous soils". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 56, p.1673-1679.
- SHUAI, F., CLEMENTS, C., RYLAND, L. & FREDLUND, D.G., 2002. "Some Factors that Influence Soil Suction Measurements Using a Thermal Conductivity Sensor". *Unsaturated Soils*, págs. 325-329.
- SHULL C.A., 1916. "Measurement of the surface forces in soils". *The Botanical Gazette*, vol. LX, n°1, pp. 1-31.
- SLATYER R. O. and MCLLOYD I. C., 1961. "Practical micro-climatology" *Unesco Publ. Prepared by CSIRO*, Australia, november.
- SMILLES, D.E., VACHAUD, D. & VAUCLIN, M., 1971. "A test of the uniqueness of the soil moisture characteristic during transient, non hysteretic flow of water in a rigid soil". *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, vol. 35, p. 534-539.
- STANNARD, D.I., 1992. "Tensiometers: Theory, construction and use". *Geotechnical Testing Journal*, 15(1), pp.48-58.
- SWARBRIK G. E. "Measurement of soil suction using the filter paper method". In: *First International Conference on Unsaturated Soils/ Unsat'95*, vol.2, pp. 653 - 658 Paris, 1995.
- TABOR, D., 1979. *Gases, liquids and solids, 2nd edition*, Cambridge University Press.
- TAIZ & ZEIGER, 1998. *Plant Physiology 2nd Edition*. Sinauer Associates, Inc. Sunderland, MA.
- TAKE, W.A. & BOLTON, M.D., 2002. "A Negative Devices for the Measurements of Negative Pore Water Pressure in Centrifuge Models". *Physical Modeling On Geotechnics*, págs. 89-94.

- TARANTINO, A., BOSCO, G. & MONGIOVI, L., 2000. "Response of the IC Tensiometer With Respect to Cavitation". *Unsaturated Soils for Ásia*, págs. 309-313.
- TARANTINO, A. & MONGIOVI, L., 2002. "Design and Construction of a Tensiometer for Direct Measurement of Matric Suction". *Unsaturated Soils*, págs. 319-334.
- TERZAGHI, K., 1950 "Mechanism of landslides". In: *Mecanismos de escorregamento de terra*. Tradução de E. Picher, São Paulo.
- TINJUM, J. M., BENSON C.H. and BLOTZ L.R., 1997. "Soil-water characteristic curves for compacted clay". *Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 123 (11), pp. 1060-1069.
- THORNTON C. W. and MATHER J. R., 1955. "The water balance". *Laboratory of Climatology, John Hopkins University*, Centerton, NJ. 104p.
- TOPP G. C., 1993. "Soil water content". Boca Raton: Carter M. R., Chap. 51. In: *Soil sampling and methods of análisis*. Eds., Lewis Publishers.
- TOPP G. C., DAVIS J. L. & ANNAN A. P., 1980. "Electromagnetic determination of soil Water Content: Measurement in coaxial transmission lines". *Water Resour. Res.*, vol. 16, p. 574-582.
- TOPP G. C., DAVIS J. L., 1985a. "Time domain reflectometry (TDR) and application to irrigation scheduling", *Advances in irrigation, n°3*, pp. 107-127.
- TOPP G. C., DAVIS J. L., 1985b. "Measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR): A field evaluation". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol.49, p.19-24.
- TOPP G. C., et MILLER E. E., 1966. "Hysteretic moisture characteristics and hydraulic conductivity for glass-head media". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol.30, p.156-162.
- TRUONG H.V.P. & HOLDEN J.C. "Soil suction measurement with transistor psychrometer". In: *First International Conference on Unsaturated Soils/ Unsat'95*, vol.2, pp. 659 - 665, Paris, 1995.

- UMS, 2000. *Instruments for Environmental Measurement*. Instruções do fabricante.
- UNDP / WMO, 1974. “Hydrometeorological survey of the catchments of Lakes Victoria, Kyoja and Albert”. *Project RAF 66/025* (4 vols). Pp. 498-509.
- VACHAUD, G. et WAKR, M., 1970. “ Etude experimentale des phenomenes d’hysteresis dans les ecoulements en mileiux poreux non saturés, Etude da la conductivité hydraulique”. *Compte rendue de l Academie des Sciences de Paris.*, vol. 171, p. 175-178.
- VACHAUD, GAUDET, KURAZ, 1974. “ Air and Water during poded infiltration in a vertical bonded column of soils”. *J. of Hydrology*, vol. 22, p. 89-108.
- VAN-GENUCHTEN, M. TH., 1980. “ A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils”. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol.44, p.277-287.
- VANCLOOSTER, M., D. MALLANTS, J. DIELS, et J. FYEN, 1993. “ Determining local-scale solute transport parameter using time domain reflectometry(TDR)”. *Hydrol. (Amsterdam)*, vol. 148, p. 93-107.
- VANCLOOSTER, M., D. MALLANTS, J. VANDERBORGHT, J. DIELS, I VAN ORSHOVEN, et J. FYEN, 1995. “Monitoring solute transport in a multi-layered sandy lysimeter using time domain reflectometry”. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol.59, p.327-334.
- VAUCLIN, M., 1971. *Effets dynamiques sur la relation succion-teneur en eau lors d’ecoulements en mileiux non saturés*. These de Docteur-Ingenieur: Faculté des Sciences de l’Université de Grenoble, 113p.
- VAUCLIN, M., 1975. *Etude experimentale et numerique du grainage de nappes à surface libre*. These de Docteur ès- Sciences Physiques:Universite Scientifique et Medicale de Grenoble, 113p.
- VILLAR, L.F.S., De CAMPOS, T.M.P., 2001. “Obtenção de Uma Curva Característica de Succão pelo Uso Combinado de Técnicas Diversas”. ”.4º Symp. Solos não saturados, Porto Alegre, págs. 327-351.

- WARD, A. L., KACHANOSKI R.G. et ELRICK, D. E., 1994. "Laboratory measurements of solute transport using time domain reflectometry" *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol.58, p.1031-1039.
- WARRIK, A. W. & HUSSEN A. A., 1993. 'Scaling of Richard's equation for infiltration and drainage". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol.57, p.15-18.
- WEILLER K. W., TAMMO, S., STEENHUIS, JAN BOLL & K. J. SAMUEL KUNG, 1998. "Comparaison of ground penetrating radar and time domain reflectometry as soil water sensor". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol.62, p.1237-1239.
- WERNECK, M. M., 1996 "Introdução à instrumentação". In:*Transdutores e interfaces*. Capitulo 1, pp. 1-23, Rio de Janeiro.
- WERNECK, M. M., 1996 "Extensômetros". In:*Transdutores e interfaces*. Capitulo 4, pp. 68 - 81, Rio de Janeiro.
- WILLIAM, J., PREBBLE, R.E., WILLIAMS, W.T., and HIGNETT, C.T. 1983. "The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic". *Australian Journal of Soil Research*, 21:15-32.
- WILSON, B.N., SLACK, D.C. & LARSON, C.L., 1980. "An infiltration model: development and evaluation of its parameters". *Transactions of the ASAE* 24: 670-677.
- WOODBURN J. A. & LUCAS B. "New approaches to laboratory and field measurement of soil suction". In: *First International Conference on Unsaturated Soils/ Unsat'95*, vol.2, pp. 667 - 671, Paris, 1995.
- ZEGELIN, S.J., I, WHITE, & D.R. JENKINS, 1989. "Improved field probes for soils water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry". *Water Resour. Res.*, vol. 25, p. 2367-2376.

ANEXOS

ANEXO 1: - ESCOAMENTO DE ÁGUA EM SOLOS NÃO-SATURADOS

1.1 - Introdução:

Os parâmetros que condicionam os escoamentos em solos não saturados são a gravidade e as forças de atrito entre os grãos. Estes parâmetros são devidos essencialmente á viscosidade, enquanto que o escoamento em meio não saturado coloca em jogo a interação entre três fases: sólida, líquida e gasosa. Além da força de gravidade e forças de atrito, existem forças (Tensão superficial) importantes que intervém ao nível das interfaces água-ar-sólido.

1.2 - Equação geral do escoamento:

A equação geral de escoamento resulta da combinação da equação de continuidade, que exprime a conservação da massa da água, e da equação da dinâmica, que liga o fluxo quando da transferência de água ao gradiente de potencial que o provocou.

A equação de continuidade pode ser escrita na sua forma geral da seguinte maneira:

$$\frac{\partial(\rho_w \cdot q)}{\partial t} = -div(\rho_w \cdot q) \quad (1)$$

ρ_w : massa específica do fluido (água)

θ : umidade volumétrica

q : fluxo

Para o caso da água (fluido incompressível) da equação (1) tem-se:

$$\frac{\partial(q)}{\partial t} = -div(q) \quad (2)$$

A equação dinâmica é dada pela relação da proporcionalidade entre o fluxo de transferência e o gradiente de potencial que o provoca.

Para o escoamento em meios porosos saturados tem-se a equação de Darcy generalizada, ou seja:

$$q = -K(\mathbf{q})grad\mathbf{f} \quad (3)$$

onde

$K(\mathbf{q})$: condutividade hidráulica

\mathbf{f} : potencial da água

A equação de transferência pode ser escrita na forma:

$$\frac{\partial(\mathbf{q})}{\partial t} = div(K(\mathbf{q})grad\mathbf{f}) \quad (4)$$

ou em função da sucção \mathbf{y} :

$$\frac{\partial\mathbf{q}}{\partial t} = div(K(\mathbf{q})grad(\mathbf{y}(\mathbf{q}) - z)) \quad (5)$$

A resolução destas equações diferenciais, considerando as condições iniciais e as condições de contorno, permite a previsão da distribuição espaço-temporal da umidade nos meios porosos. A curva característica de retenção de umidade no instante t permite a avaliação da quantidade de água que entra ou que sai, segundo o caso, nos meios porosos. Esta resolução é possível quando as relações $\mathbf{y}(\mathbf{q})$ e $K(\mathbf{q})$ são conhecidas no intervalo de variação do teor de umidade.

1.2.1 – A Difusividade:

A difusividade foi descrita por (CHILDS e COLLIS-GEORGE, 1948) como:

$$D(\mathbf{q}) = K(\mathbf{q}) \frac{\partial\mathbf{y}}{\partial\mathbf{q}} \quad (6)$$

\mathbf{y} : a sucção

O termo da difusividade não implica no avanço da água por difusão molecular nos poros, e não há analogia formal entre a primeira Lei de Fick e a Equação de escoamento quando estamos no plano horizontal.

A introdução da Difusividade simplifica o tratamento matemático das equações descrevendo o escoamento horizontal. No entanto, a relação $D(\psi)$ é fortemente influenciada pelo efeito de histerese na relação $\psi(\theta)$ (VAUCLIN,1971; SMILES,1971). A difusividade é também ligada à geometria do meio, à natureza da interação entre o fluido e a matriz sólida, às condições iniciais e aos limites de escoamento (LAROUSSE e DENACKER, 1975).

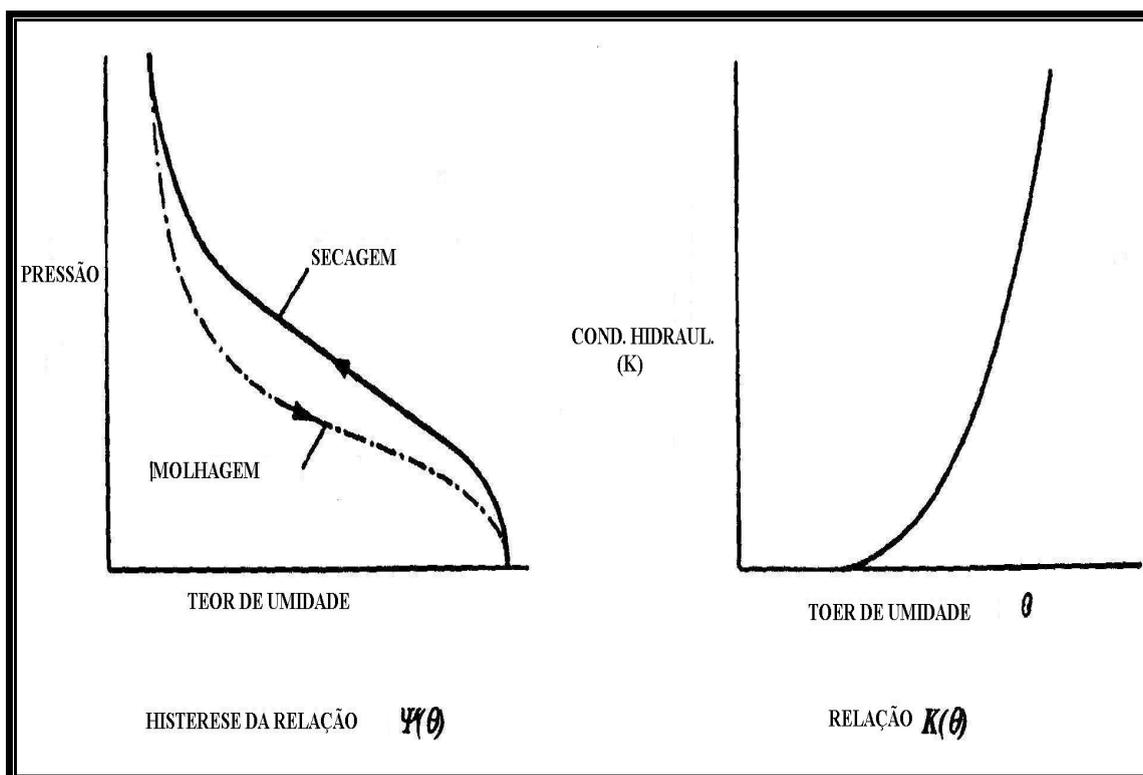


Figura 1: - Histerese da relação $\psi(\theta)$ e Relação $K(\theta)$ (GAIDI, L., 2002)

De acordo com a equação geral do movimento (equação 5) pode-se admitir que a relação $\psi(\theta)$ durante um escoamento, é idêntica aquela obtida no equilíbrio estático para uma mesma história do material (BENTOUMI,1995). Em outros termos, suponha-se que a relação ligando a sucção ao teor de umidade é independente do escoamento. E idem para a relação $K(\theta)$. Assim, quando considerar-se um escoamento uniforme, isto é um processo de drenagem ou de embebição a partir de condições iniciais homogêneas relativos ao teor de umidade (ou a sucção), elimina-se assim qualquer fenômeno de histerese e a relação $\psi(\theta)$ deve ser unívoca.

Dentre essas condições, a escolha da variável descritiva do movimento permite estabelecer, a partir da equação geral de escoamento (equação, 5), equações de uma única variável.

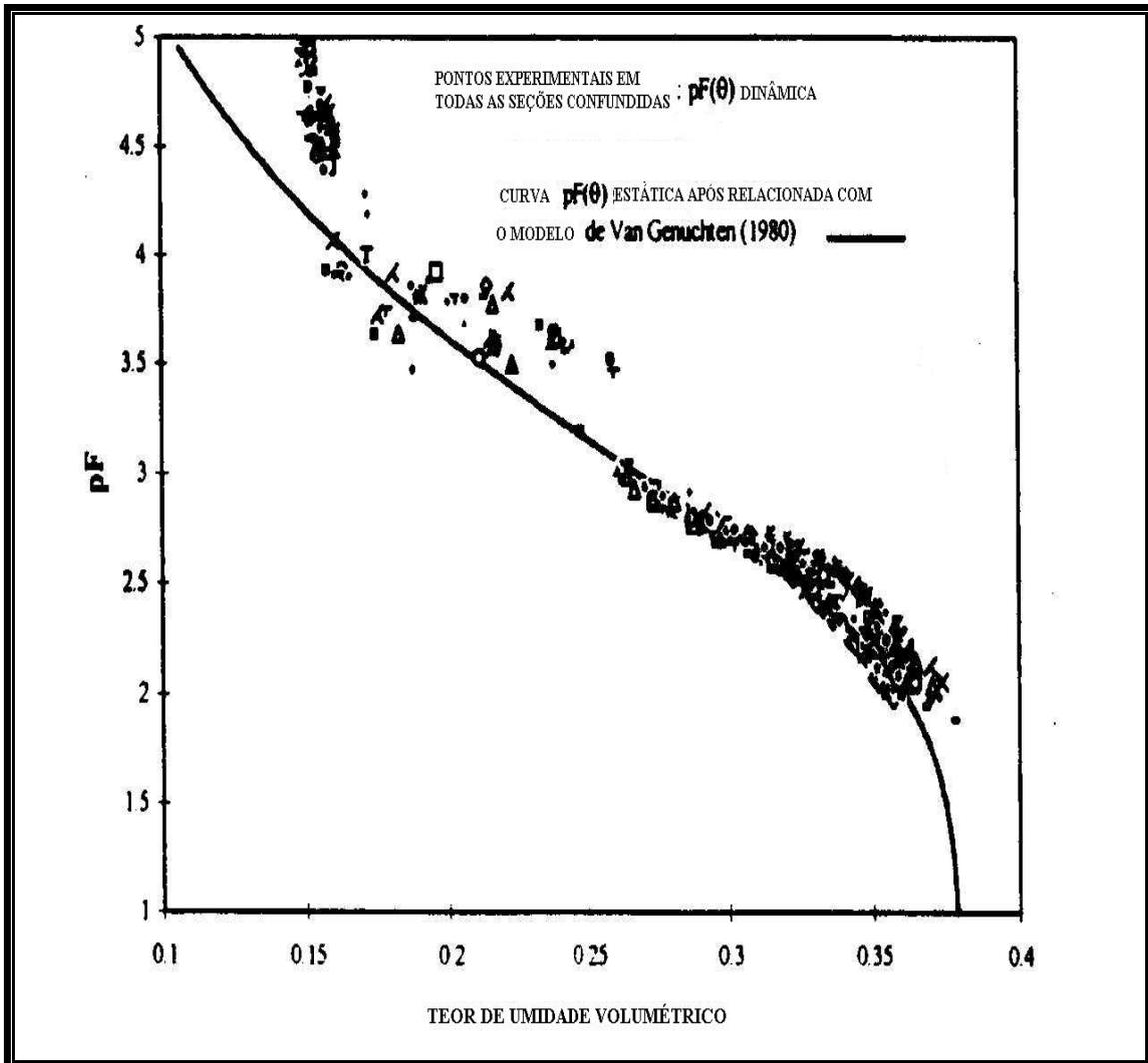


Figura 2: - Comparação entre curvas estática e dinâmica da relação $pF = \log \theta = f(\theta)$ (BENTOUMI, 1995).

1.2.2 – Equação em θ :

Introduzindo a difusividade $D(\theta)$ na equação geral de escoamento (equação 5), tem-se:

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} = \text{div}(D(\mathbf{q}) \text{grad}(\mathbf{q})) - \frac{\partial K(\mathbf{q})}{\partial z} \quad (7)$$

$$\text{com: } D(q) = K(q) \frac{\partial y}{\partial q}$$

A equação (7) é conhecida sob o nome de equação de Fokker-Plank. Ela pode ser resolvida de maneira quase analítica neste caso particular (PHILIP, 1957^a). Entanto, ela não pode descrever o movimento de água na zona saturada. Na zona saturada tem-se em todos os pontos um teor de umidade constante igual ao teor de umidade de saturação, e a escolha deste variável provoca uma indeterminação no domínio saturado. Esta equação não pode então ser utilizada no caso onde a análise comportaria um problema de infiltração por submersão ou de acoplamento entre infiltração e lençol freático.

1.2.3 - Equação em ? :

A capacidade capilar do solo é definida como:

$$C(y) = \frac{\partial q}{\partial y} \quad (8)$$

Ela permite de escrever a equação 23 na forma:

$$C(y) \frac{\partial y}{\partial t} = \text{div}(K(y) \text{grad}(y)) - \frac{\partial K(y)}{\partial z} \quad (9)$$

A capacidade capilar C(?) atesta a aptidão do meio poroso em reter ou liberar a água sob o efeito de uma variação da pressão.

A introdução da carga efetiva ou sucção ? como variável descritiva na equação 5 elimina a ambigüidade assinalada para a equação de Fokker-Plank, já que ? varia de uma maneira continua dentre todo o domínio do escoamento (VAUCLIN,1975), passando de valores positivos (na zona saturada) para valores negativos (na zona não saturada).

1.2.4 - Soluções particulares das equações de escoamento.

As soluções da equação geral de escoamento não podem ser obtidas para casos particulares de escoamento, e apos a definição das condições iniciais e das condições nos limites do domínio de escoamento.

De fato, o aspecto fortemente não linear da equação de transferência de água em meio poroso não saturado torna difícil a pesquisa de soluções analíticas do problema de infiltração.

1.2.4.1 - Infiltração horizontal:

A equação (7) se reduz a:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(q) \frac{\partial q}{\partial x} \right) \quad (10)$$

Com x na direção horizontal.

Se o escoamento tiver ocorrido numa coluna semi-infinita, a um teor de umidade volumétrica inicial θ_i e que na superfície (plano $x=0$) o teor de umidade é mantido constante a θ_o (teor de umidade de saturação), as condições limites da equação 10 são:

$$\text{Para } t=0 \quad \text{e } x > 0 \quad : \quad \theta = \theta_i \quad (11)$$

$$\text{Para } t = 0 \quad \text{e } x = 0 \quad : \quad \theta = \theta_o$$

Utilizando a transformação de Bolzmann:

$$h = \frac{x}{\sqrt{t}} \quad (12)$$

A equação (10) sujeita às condições da equação (11) transforma-se em:

$$-\frac{h}{2} \frac{dq}{dh} = \frac{d}{dh} \left(D \frac{dq}{dh} \right) \quad (13)$$

Com as condições:

$$h = 0 \quad : \quad \theta = \theta_o \quad (14)$$

$$h \rightarrow \infty \quad : \quad \theta = \theta_i$$

a solução da equação (10) com as condições (11) é:

$$x(q, t) = h(q) \sqrt{t} \quad (15)$$

com $h(q)$ solução da equação (13) colocado nas condições (14). A função $h(q)$ pode ser obtida por métodos numéricos (KLUTE,1952; PHILIP,1954) ou analítica (PHILIP,1960).

A equação (13) pode ser escrita na forma:

$$-\frac{h}{2} = \frac{d}{dq} \left(D \frac{dq}{dh} \right) \quad (16)$$

o que permita, após integração, de obter:

$$\int_{q_i}^{q_o} h dq = -2D \frac{dq}{dh} \quad (17)$$

com $h=0$: $q=q_o$

Para um teor de umidade dado, a equação(13) mostra que a progressão deste teor de umidade em uma coluna horizontal durante a infiltração, se faz proporcionalmente à raiz quadrada do tempo.

Introduzindo o símbolo I , designando a infiltração acumulada dentre um meio poroso no instante t , tem-se:

$$I = \int_{q_i}^{q_o} x(q,t) dq = \int_{q_i}^{q_o} h(q) dq \sqrt{t} \quad (18)$$

Sendo

$$S = \int_{q_i}^{q_o} h(q) dq$$

então, a infiltração acumulada pode ser escrita como:

$$I = S\sqrt{t} \quad (19)$$

A velocidade de infiltração no plano $x=0$ é definida por:

$$V_o = \frac{dI}{dt} = \frac{1}{2} S\sqrt{t} \quad (20)$$

$S(\text{cm/s}^{1/2})$ é a sorptividade do meio poroso. Ela deve ser função da dupla (θ_i, θ_o) ou

(y_i, y_o) . Deveremos escrever então $S(q_i, q_o)$ ou $S(y_i, y_o)$.

1.2.4.2 - Infiltração vertical:

Quando o movimento da água numa camada do solo é vertical, a equação (7) se escreve na forma:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(q) \frac{\partial q}{\partial z} \right) - \frac{dK}{dq} \frac{\partial q}{\partial z} \quad (21)$$

Quando a camada é semi-infinita (com z ordenada vertical para baixo), com um teor de umidade volumétrico inicial θ_i e que em superfície ($z=0$) o teor de umidade é mantido constante e igual a θ_o , as condições aplicadas à equação (39) são:

$$\text{Para } t=0 \text{ e } z>0 : \theta = \theta_i \quad (22)$$

$$\text{Para } t=0 \text{ e } z=0 : \theta = \theta_o$$

Por extensão do caso de infiltração horizontal, PHILIP(1957a) desenvolveu a solução da equação (39) colocada nas condições (40) sob forma de serie de potencias de \sqrt{t} :

$$z(q, t) = f_1 t^{1/2} + f_2 t + f_3 t^{3/2} + f_4 t^2 + \dots + f_n t^{n/2} \quad (23)$$

onde $f_n(q)$ independe do teor de umidade volumétrico. As funções $f_n(\theta)$ são soluções da equações diferenciais ordinárias (PHILIP,1969) onde as funções $D(\theta)$ e $K(\theta)$ são supostas conhecidas.

Para $n=1,2$ tem-se:

$$\int_{q_i}^q f_1 dq = -\frac{2D}{f_1} \quad (24)$$

$$\int_{q_i}^q f_2 dq = -\frac{Df_2'}{(f_1)^2} + (K - K_i) \quad (25)$$

Para $n = 3$, tem-se:

$$\int_{q_i}^q f_n dq = \frac{2D}{n} \left[\frac{f_n'}{(f_1)^2} - R_n(q) \right] \quad (26)$$

As funções f_n devem verificar a condição no seguinte limite:

$$f_n(q_0) = 0 \quad \text{para } n = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (27)$$

Pode-se admitir uma identidade formal entre a função $h(q)$ da solução de Boltzmann e a função $f_1(q)$. Pode-se assim resolver a equação (24) com as condições (27). Então o conhecimento da função f_{n-1} permite o cálculo da função f_n ainda verificando a condição nos limites (27). O Figura 3 mostra o esquema das quatro primeiras funções da equação (23), calculadas no caso de uma infiltração vertical num solo argiloso. Os perfis hídricos correspondentes são representados na Figura 3.

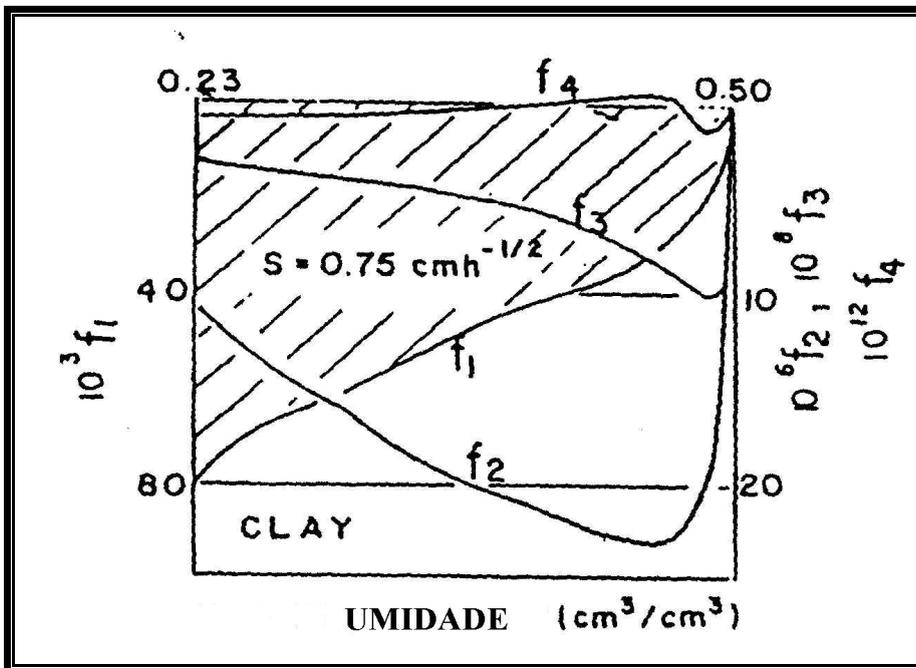


Figura 3:- Evolução das 4 primeiras funções da serie de Philip(1969) em função do teor de umidade volumétrica (GAIDI, L., 2002).

A lamina de água infiltrada I obtém-se pela integração dos perfis $z(\mathbf{q}, t)$, ou seja:

$$I(t) = K_i t + \int_{\mathbf{q}_i}^{\mathbf{q}_0} z(\mathbf{q}, t) d\mathbf{q} \quad (28)$$

onde K_i é a Condutividade hidráulica para o teor de umidade $\mathbf{q} = \mathbf{q}_i$. Em função da equação(23), a equação (28) pode ser escrita como:

$$I(t) = K_i t + \sum_{n=1}^{n=\infty} \left(\int_{\mathbf{q}_i}^{\mathbf{q}_0} f_n(\mathbf{q}) d\mathbf{q} \right) t^{n/2} \quad (29)$$

e:

$$I(t) = S t^{1/2} + (A_2 + K_i)t + A_3 t^{3/2} + A_4 t^2 + \dots + A_n t^{n/2} \quad (30)$$

A_n é definida por:

$$A_n = \int_{\mathbf{q}_i}^{\mathbf{q}_0} f_n(\mathbf{q}) d\mathbf{q}$$

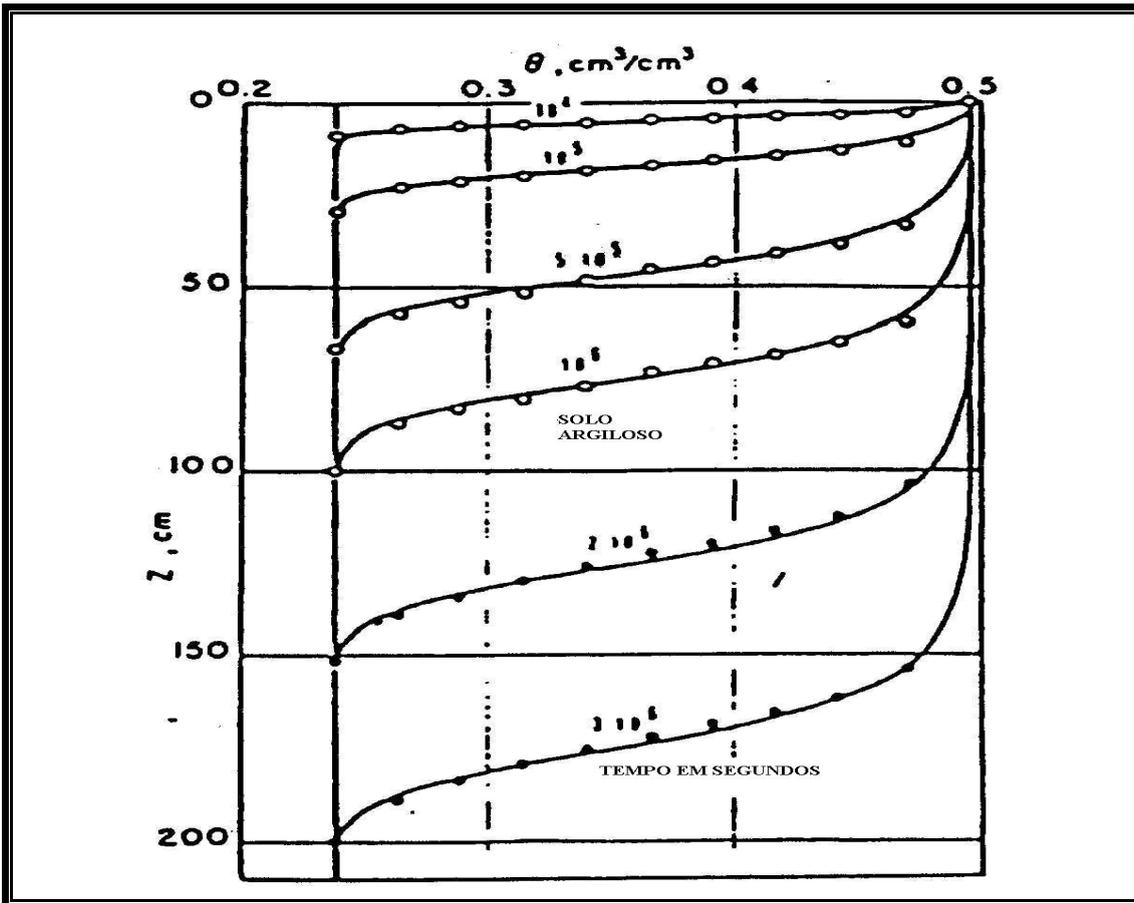


Figura 4: Perfis hídricos calculados a partir das 4 primeiras funções da serie de Philip (GAIDI, L., 2002).

A fim de traçar a distribuição espaço-temporal do teor de umidade, introduz-se a transformação de Boltzmann (equação 12).

Pode-se facilmente determinar a profundidade da penetração da água numa infiltração vertical utilizando o perfil de GREEN e AMPT(1911).

Este perfil de GREEN e AMPT(1911) é dado por:

$$q = \begin{cases} q_s, 0 \leq h \leq h_G \\ q_0, h \geq h_G \end{cases} \quad (31)$$

q_s : é o teor de umidade de saturação

q_0 : é o teor de umidade volumétrico inicial

h : é o parâmetro de Boltzmann

$$h_G \text{ é dada por: } h_G = \frac{S}{(q_s - q_0)} \quad (32)$$

A sorptividade, S (cm/s^{1/2}), é definida por (PHILIP,1957):

$$S(q_0, q_s) = \int_{q_0}^{q_s} h(q) dq \quad (33)$$

Para uma infiltração acumulada I_z , a frente de umidade será à profundidade z_G dada por:

$$z_G = \frac{I_z}{(q_s - q_0)} \quad (\text{ELRICK et al.,1983}) \quad (34)$$

1.3 - Modelos de descrição das curvas de infiltração.

O processo físico da infiltração trata do movimento da água no solo. Vários modelos foram propostas para descrever o fenômeno de infiltração. A maioria destes visa a estimativa do valor da permeabilidade do solo.

▪ Modelo de LEWIS e MILNE (1938): é uma equação empírica descrevendo a evolução da infiltração acumulada I sob forma de uma função exponencial do tempo.

$$I = L - L \exp(-Mt) \quad (35)$$

M e L são constantes empíricas.

▪ Modelo de HORTON (1940): similar àquele de LEWIS e MILNE (1938).

$$I = H - H \exp(-A.t) + C.t \quad (36)$$

H , L e C são constantes empíricas.

▪ Modelo de GREEN e AMPT: A lei de Darcy permite escrever:

$$q = \frac{dI}{dt} = -K_s \frac{h_f - h_0 - z_f}{z_f} \quad (37)$$

h_f : pressão efetiva ao nível da frente de umedecimento

h_0 : carga hidráulica imposta na superfície

z_f : profundidade da frente de umedecimento

A existência da zona molhada que se estende até à frente de umedecimento, permite escrever:

$$I = z_f (q_s - q_i) = z_f \cdot \Delta q \quad (38)$$

q_i : teor de umidade volumétrico inicial

q_s : teor de umidade volumétrico de saturação.

$$\frac{dI}{dt} = -K_s \left(-1 + \frac{(h_f - h_0) \Delta q}{I} \right) \quad (39)$$

A integração da equação 39 com a condição $I=0$ para $t=0$ fornece:

$$K_s \cdot t = I + (h_f - h_0) \Delta q \cdot \ln \left(1 - \frac{I}{(h_f - h_0) \Delta q} \right) \quad (40)$$

O modelo de GREEN e AMPT é essencialmente semi-empírico, pois o valor da pressão efetiva ao nível da frente de umedecimento deve ser determinado experimentalmente.

▪ Modelo de PHILIP: para tempos relativamente pequenos, a série da equação (30) limitada a esses dois primeiros termos pode ser escrita como:

$$I = S\sqrt{t} + A \cdot t \quad (41)$$

onde S é a sorção, sendo A um parâmetro tendo a dimensão de uma velocidade e I a infiltração acumulada. Por derivação de (41), a velocidade de infiltração se escreve:

$$V_o(t) = \frac{dI}{dt} = \frac{1}{2} S\sqrt{t} + A \quad (42)$$

Para grandes intervalos de tempos, é possível representar (41) segundo (HANK e ASCHROFT, 1980):

$$I = S\sqrt{t} + K_s t \quad (43)$$

tal que:

$$V_o(t) = \frac{dI}{dt} = \frac{1}{2} S t^{-1/2} + K_s \quad (44)$$

Apresentando os resultados experimentais no diagrama $(\sqrt{t}, 1/\sqrt{t})$ obtém-se uma reta.

$$I/\sqrt{t} = S + A\sqrt{t} \quad (45)$$

É possível determinar por regressão linear os parâmetros S e A (Figura 5) usando a equação 41 ou 45.

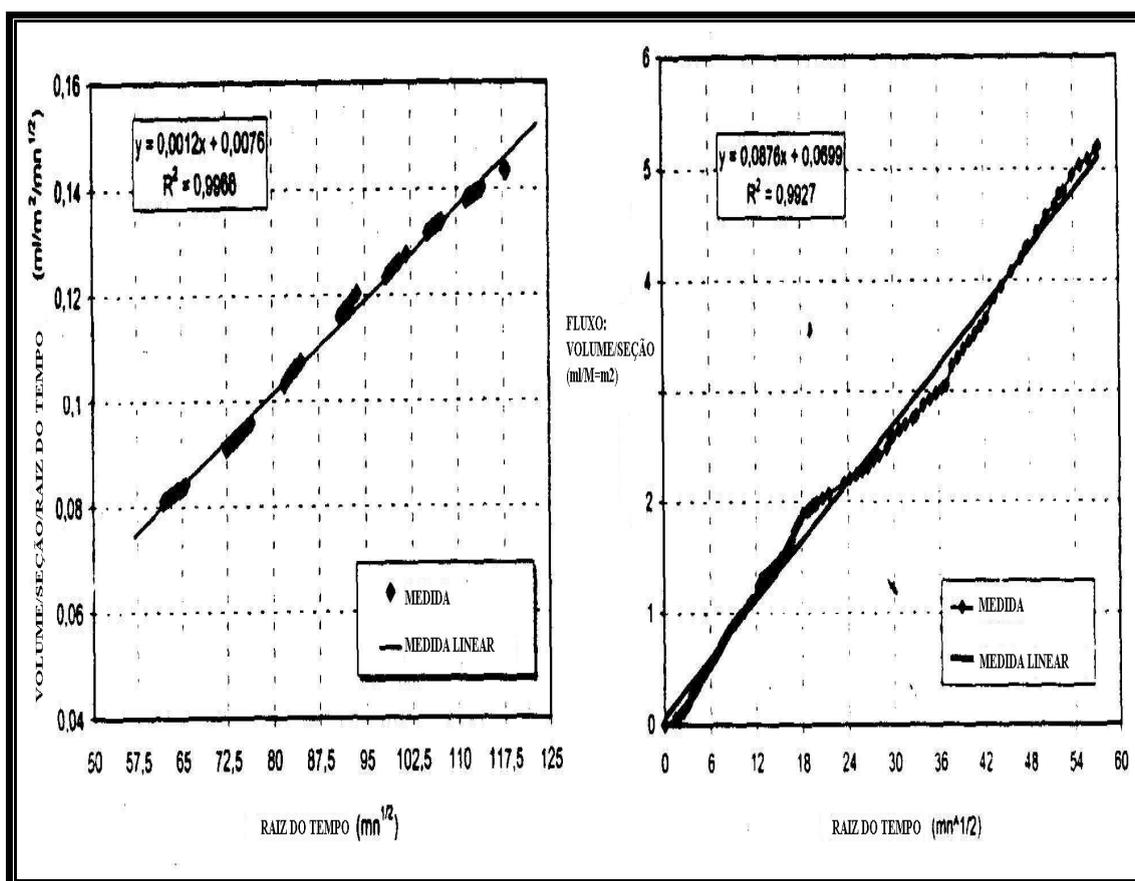


Figura 5: - Ensaio de infiltração vertical ajustada à equação (63) (GAIDI, L., 2002).

Ensaio de infiltração vertical ajustado à equação 63

▪ Modelo de PHILIP – GREEN-AMPT: para tempos breves, a infiltração I é pequena e o termo $I/[(h_f - h_0)\Delta q]$ da equação (40) é muito menor que 1. Desenvolvendo o termo acima com o auxílio de logaritmos neperianos obtém-se a equação (46) em serie de Taylor limitada aos dois primeiros termos, pode-se escrever:

$$K_s t \approx \frac{I^2}{2(h_f - h_0)\Delta q} \quad (46)$$

ou

$$I \approx (-2K_s(h_f - h_0)\Delta q)^{1/2} \sqrt{t} \quad (47)$$

seja por identificação à lei de Philip na origem:

$$I = S\sqrt{t} \quad (48)$$

tem-se

$$S \approx (-2K_s(h_f - h_0)\Delta q)^{1/2} \quad (49)$$

1.4 - Influencia de alguns parâmetros no fenômeno de infiltração.

O fenômeno de infiltração pode ser influenciado por certos parâmetros ligados à natureza do material, mas outros são ligados às condições iniciais e às condições limites aplicadas ao domínio do escoamento (PHILIP, 1957; BENTOUMI et ALIMI, 1993).

5.4.1 - Influencia do teor de umidade inicial

O aumento do teor de umidade volumétrico inicial θ_i do solo provoca, durante uma infiltração, uma diminuição da velocidade de infiltração de água v no solo. Este efeito atenua-se quando o tempo de infiltração aumenta, e por conseqüência a velocidade de infiltração final não é influenciada (PHILIP, 1957). Com o aumento do tempo observa-se um paralelismo das curvas de infiltração correspondentes (Figura 6).

E também, o aumento de θ_i induz um aumento da velocidade de avanço da frente de umedecimento no perfil do solo (Figura 6). Isto é devido ao fato que, quando θ_i aumenta, a capacidade de estocagem do solo diminui.

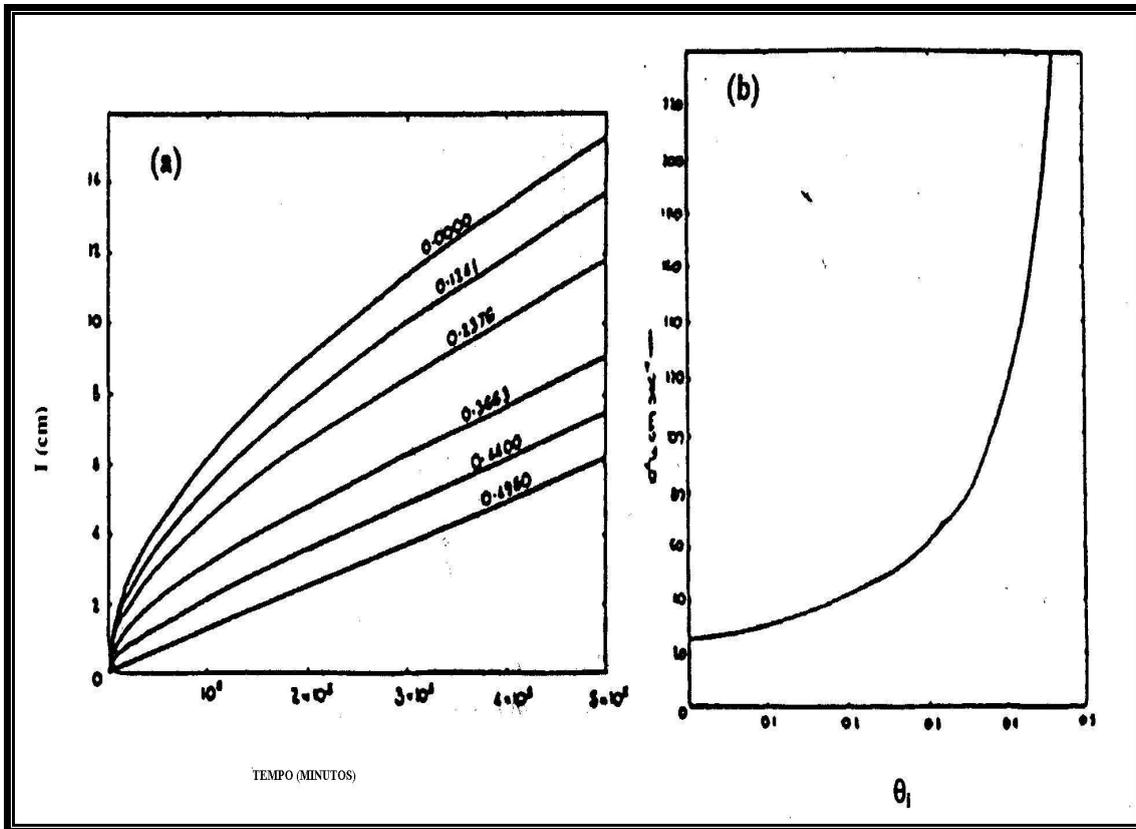


Figura 6: - Influência do teor de umidade volumétrico inicial (Philip, 1957e)

- a) – Infiltração acumulada I
- b) – Velocidade de avanço da frente de umedecimento

1.4.2 - Influência da carga de água

O aumento da carga de água, aplicado à superfície de um solo durante uma infiltração, provoca um aumento da velocidade de penetração de água V_0 no início da infiltração. Este acréscimo fica cada vez menos importante quando o tempo de infiltração tende para o infinito (Figura 7.a) (PHILIP,1969). Pode-se observar o mesmo fenômeno sobre a velocidade de avanço da frente de umedecimento no solo. Quando o tempo é importante, as inclinações da curva de infiltração tendem gradualmente para a velocidade e infiltração final, (Figura 7.b).

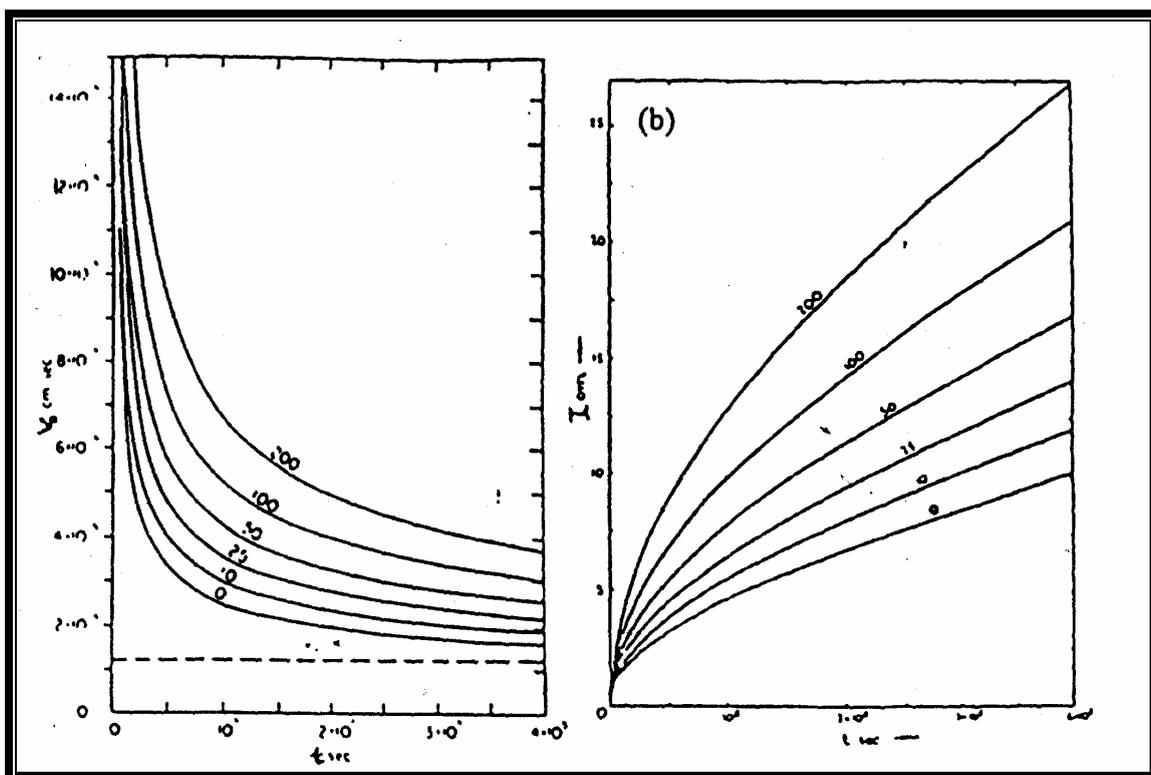


Figura 7: - Influência da carga de água.

a)– velocidade de infiltração V_0 (PHILIP, 1969)

b)– infiltração acumulada I (PHILIP, 1957 f)

1.5 - Medida da condutividade hidráulica

1.5.1 - Métodos de medidas indiretas

Para uma absorção seguindo o eixo Ox no meio poroso não saturado, tem-se as seguintes condições:

$$\text{Para } t=0 \text{ e } x > 0 : \theta = \theta_i \quad (50)$$

$$\text{Para } t > 0 \text{ e } x = 0 : \theta = \theta_0$$

Com θ_i e θ_0 respectivamente o teor de umidade volumétrico inicial e o teor de umidade volumétrico na superfície de contato com a água.

Introduzindo a transformação de Boltzmann $\left[h(q) = xt^{1/2} \right]$; I é dada por (PHILIP, 1969):

$$I = S(q_i, q_0) \sqrt{t} \quad (51)$$

A sorptividade S é definida pela equação (33)

Para uma difusividade D constante, $D=D^*$, resulta segundo a resolução da equação (10) (PHILIP, 1969), que:

$$I = 2(q_0 - q_i) \sqrt{\frac{D^* t}{p}} \quad (52)$$

Segundo(27)e(29), obtém-se:

$$D^* = \frac{pS^2}{4(q_0 - q_i)^2} \quad (53)$$

D^* pode ser escolhida como a media ponderada \bar{D} da difusividade. Isto é quer dizer que \bar{D} é um valor constante da difusividade dando o mesmo fluxo que a difusividade variável $D(?)$ durante o processo de escoamento(CRANK,1975); pode-se escrever então:

$$D^* = \bar{D} = \int_{q_i}^{q_0} \frac{D(q)}{(q_0 - q_i)} dq \quad (54)$$

então

$$\int_{q_i}^{q_0} D(q) dq = \frac{pS^2}{4(q_0 - q_i)} \quad (55)$$

derivando (55) em relação a q_0 , tem-se:

$$D(q_0) = \frac{d}{dq_0} \left(\frac{pS^2(q_0, q_i)}{4(q_0 - q_i)} \right) \quad \text{com } q_i \text{ constante} \quad (56)$$

\bar{D} é uma boa aproximação de D^* se a difusividade D é uma função linear do teor de umidade volumétrico q . No entanto, para um certo número de leis da evolução não linear da difusividade em função do teor de umidade durante o primeiro instante do processos de adsorção ou desorção, o valor numérico da media ponderada da difusividade \bar{D} é dada pela seguinte expressão:

$$\bar{D}_g = \frac{1+g}{(q_0 - q_i)^{1+g}} \int_{q_i}^{q_0} (q_0 - q_i)^g D(q) dq \quad (57)$$

Igualando as equações (53) e (57) tem-se

$$\int_{q_i}^q (q_0 - q_i)^g D(q) dq = \frac{1}{1+g} \frac{pS^2}{4(q_0 - q_i)^{1-g}} \quad (58)$$

a derivação dos dois membros desta equação em relação a q_0 fornece:

$$D(q_0) = \frac{1}{1+g} \frac{1}{(q_0 - q_i)^g} \frac{d}{dq_0} \left(\frac{pS^2(q_0, q_i)}{4(q_0 - q_i)^{1-g}} \right) \quad (59)$$

Com $g=0.62$ para uma absorção e $g=0.85$ para uma desorção

Então, se a curva de retenção do solo é estabelecida, a condutividade hidráulica pode ser calculada por:

$$K(y) = D(q(y)) \frac{dq}{dy} \quad (60)$$

O método do perfil instantâneo é um método indireto de medida da condutividade hidráulica de um solo. Ela consiste em impor uma infiltração a uma extremidade de uma camada de solo e a medir as variações espaço temporais da umidade $\theta(z,t)$ ou do potencial hídrico $F(z,t)$. Os métodos e as técnicas de medida de $\theta(z,t)$ se fazem por seccionamento da camada (BRUCE e KLUTE, 1956; BENTOUMI e ALIMI, 1996) ou por métodos não destrutivos tal como método TDR (TOPP e AL., 1980; ALIMI-ICHOLA, 1998; ALIMI e GAIDI, 1999). O potencial $F(z,t)$ pode ser medida seja por tensiometria (VAUCHAUD e AL., 1974) seja por Psicrometria (DANIEL, 1982).

Para um fluido incompressível, a equação da continuidade se escreve;

$$\frac{\partial q}{\partial z} = -\frac{\partial q}{\partial t} \quad (61)$$

A integração de (61) entre duas posições z_1 e z_2 dá:

$$q(z_1, t) - q(z_2, t) = \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_1}^{z_2} q(z, t) dz \quad (62)$$

se para uma posição $z=H$ tem-se um fluxo nulo:

$$q(t)|_z = \frac{1}{\Delta t} \int_{z_1}^H (\mathbf{q}(z, t + \Delta t) - \mathbf{q}(z, t)) dz. \quad (63)$$

Então a partir da equação (3) e (63), pode-se calcular a condutividade hidráulica.

$$K(t)|_z = - \frac{q(t)|_z}{\left. \frac{\partial f(t)}{\partial z} \right|_z} \quad (64)$$

Esta equação permite escrever:

$$K(\mathbf{q})|_{z,t} = - \frac{q(\mathbf{q})|_z}{\left. \frac{\partial f(\mathbf{q})}{\partial z} \right|_z}. \quad (65)$$

A difusividade é então dada pela relação (6). Seja:

$$D(\mathbf{q}) = K(\mathbf{q}) \frac{\partial y(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \quad (66)$$

quando se conhece a curva de sucção $\theta(\psi)$.

A condutividade hidráulica depende fortemente da concentração da água e também da historia da variação desta concentração. A relação entre a condutividade hidráulica e o teor de umidade volumétrico $K(\theta)$ foi objeto de varias controvérsias; o problema sendo se de fato a historia tem influencia. Diferentes estudos experimentais (TOPP e MILLER, 1966; VACHAU e WALKI, 1970) mostraram uma histerese importante desta relação entre as curvas de drenagem a partir da saturação e as curvas de umedecimento de um solo seco. No entanto, assim que o solo fica úmido, esta histerese fica desprezível para altos valores de umidade.

A relação $D(\theta)$, equação (66), é muito fortemente influenciada pelo efeito de histerese da relação $\theta(\psi)$. Ela é ligada também à geometria do meio poroso, à natureza da interação entre o fluido e a matriz do solo, às condições iniciais e aos limites de escoamento.

1.5.2 - Modelos empíricos da condutividade hidráulica:

Vários modelos empíricos foram propostas para descrever a variação da condutividade hidráulica em função do teor de umidade volumétrica ou da sucção. Apresentam-se abaixo algumas expressões empíricas utilizadas nos modelos de transferência hidráulicas em meio poroso não saturados (WARRIK e HUSSEN, 1993; ECHING e Al., 1993), ou na caracterização hidrodinâmica dos solos in-situ (SHOUSE e Al., 1992; LOGSDON e LAYNES, 1993).

É definida como teor de umidade efetiva Θ por:

$$\Theta = \frac{q - q_r}{q_s - q_r} \quad (67)$$

Com

q - teor de umidade volumétrico

q_i - teor de umidade volumétrico inicial

q_s - teor de umidade volumétrico de saturação

q_r - teor de umidade volumétrico residual

No que segue, designa-se por:

h - a sucção

p_e - a pressão de entrada de ar

$K(\theta)$ – a condutividade hidráulica á teor de umidade ?

K_s – a condutividade hidráulica á $\theta = \theta_s$

❖ Modelo de MUALEM(1976) e VAN GENUCHTEN (1980): A condutividade hidráulica segundo este modelo é dada por:

$$K(\theta) = K_s \theta^p \left(1 - \left(1 - \theta^{1/m} \right)^m \right)^2 \quad (68)$$

A curva de retenção associada a este modelo é:

$$\theta = \left(1 + (a y)^n \right)^{-m} \quad (69)$$

$$0 < m < 1$$

$$n = 1/(1-m)$$

$$p=0.5$$

m, n e p são constantes que caracterizam o solo.

❖ Modelo de GARDNER (1958) e RUSSO (1988): A condutividade hidráulica segundo este modelo é dada por:

$$K(y) = K_s \exp(a y) \quad (70)$$

A curva de retenção associada a este modelo é:

$$\theta = \left(\exp(a y / 2) (1 - (a y) / 2) \right)^{2/(m+2)} \quad (71)$$

m=0, a e m são constantes empíricas.

❖ Modelo de GARDNER (1960): A condutividade hidráulica segundo este modelo é expressa por:

$$K(y) = K_s \frac{a}{|y|^n + a} \quad (72)$$

a e n são parâmetros empíricos com n variante de 1,5 para os solos argilosos a 4 para os solos a textura grosseira.

❖ Modelo de VACHAUD (1966): A condutividade hidráulica segundo este modelo é representada por:

$$K(\mathbf{y}) = K_s \left(\frac{\mathbf{q} - \mathbf{q}_r}{\mathbf{q}_s - \mathbf{q}_r} \right)^{2,5} \quad (73)$$

Esta expressão empírica é sobre tudo satisfatória para solos arenosos ou siltosos

❖ Modelo de RIJTEMA (1965): A condutividade hidráulica segundo este modelo é:

$$K(\mathbf{y}) = \frac{K_s}{\exp(a|\mathbf{y}|)} \quad (74)$$

onde a, parâmetro empírico que varia de 1 a 3 para argilas ou 4 para areias.

❖ Modelo de BROOKS e COREY (1966) e CAMPBELL (1974): A condutividade hidráulica segundo este modelo é fornecida por:

$$K(\mathbf{q}) = K_s \left(\frac{\mathbf{q}}{\mathbf{q}_s} \right)^m \quad (75) \quad \text{quando } \Psi > \Psi_e$$

A curva de retenção associada a este modelo é escrita como:

$$\mathbf{y} = \mathbf{y}_e \left(\frac{\mathbf{q}}{\mathbf{q}_s} \right)^{-b} \quad (76) \quad \text{quando } \Psi > \Psi_e$$

$$m = 2b + 3$$

m e b são constantes empíricas

❖ Modelo de BROOKS e COREY (1964): A Condutividade hidráulica segundo este modelo é dada por:

$$K(\mathbf{y}) = K_s \left(\frac{\mathbf{y}_e}{\mathbf{y}} \right)^m \quad (77) \quad \text{quando } \Psi = \Psi_e < 0$$

$K = K_s$ e $\mu = \mu_s$ quando $\mu > \mu_e$

A curva de retenção associada a este modelo é dada pela equação:

$$q(y) = (q_s - q_i) \left(\frac{y_e}{y} \right)^b + q_i \quad (78) \quad \text{quando } \mu = \mu_e$$

onde μ e β são constantes do solo.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)