

# CALIBRAÇÃO DE UM REFLECTÔMETRO PARA ESTUDOS DO FLUXO DE ÁGUA EM SOLO NÃO SATURADO

Miguel Angel ALFARO SOTO, Damaris Miyashiro KUMAYAMA, Hung Kiang CHANG

Laboratório de Estudo de Bacias, Departamento de Geologia Aplicada, Universidade Estadual Paulista,  
Campus de Rio Claro. Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista. CEP 13506-900. Rio Claro, SP.  
Endereços eletrônicos: alfaros@rc.unesp.br; damiyashiro@hotmail.com; chang@rc.unesp.br.

- Introdução
- Métodos Teóricos e Experimentais
  - Reflectometria no Domínio Tempo
  - Retenção de Água no Solo
    - Ensaio para Medida da Sucção nos Solos
  - Condutividade Hidráulica de Solos Não Saturados
    - Determinação do Coeficiente de Condutividade Hidráulica de Solos Não Saturados
  - Calibração do Aparelho
    - Relação entre o Sinal do Aparelho e Umidade do Solo
    - Relação entre Sinal do Aparelho e a Sucção do Solo
    - Ensaio para Determinação da Curva de Retenção pelo Método do Papel Filtro
    - Relação entre o Sinal do Aparelho e Condutividade Hidráulica do Solo Não Saturado
    - Ensaio Complementares
- Resultados e Discussões
  - Descrição do Solo Estudado
  - Ensaio para Determinação da Retenção de Água no Solo
  - Calibração e Reflectômetro
    - Obtenção da Relação do Sinal *versus* Umidade do Solo
    - Obtenção da Relação do Sinal do Aparelho *versus* Sucção Matricial do Solo e Condutividade Hidráulica do Solo Não Saturado
- Conclusões
- Referências Bibliográficas

**RESUMO** – Este trabalho trata sobre a calibração de um aparelho baseado na técnica TDR para estudos do fluxo de água em solo não saturado, com base na medição indireta da umidade, sucção matricial ( $\psi$ ) e condutividade hidráulica não saturada  $k(\psi)$ , num perfil de solo inalterado. Isto é possível mediante ensaios de laboratório decorrentes da mecânica de solos tradicional e não saturada, a partir de amostras indeformadas retiradas a diferentes profundidades durante a construção de um poço, onde foram instaladas as sondas do TDR. Dos ensaios, obtiveram-se equações polinomiais para relacionar o comportamento da variação do período de tempo do pulso eletromagnético percorrido pela sonda TDR com a variação da umidade do solo e modelos de van Genuchten (1980) para relacionar a umidade com ( $\psi$ ) e  $k(\psi)$ . Os resultados mostraram que, para a calibração da umidade neste tipo de solos, um ajuste polinomial de quarto grau se apresenta como melhor alternativa em relação às expressões existentes em lugares onde foram derivadas estas teorias. Adicionalmente, se observou, que as maiores variações de ( $\psi$ ) e  $k(\psi)$  ocorrerão entre a saturação e 10% de umidade devido à peculiaridade da curva de retenção. Finalmente, a presente calibração se apresenta como um expediente útil e prático para estudos hidrodinâmicos de solos não saturados.

**Palavras-chave:** calibração, reflectômetro, teor de umidade, solo não saturado.

**ABSTRACT** – M. A. A. Soto, D. M. Kumayama, H. K. Chang - Calibration of a reflectometer for water flow studies in un-saturated soils. This work aims to the calibration of an equipment based on TDR technique for water flow studies in unsaturated soils, based on indirect measurement of the humidity, matricial suction ( $\psi$ ) and unsaturated hydraulically conductivity  $k(\psi)$ , in an not deformed soil profile. This be possible by recurrent laboratory tests of the traditional and unsaturated soil mechanics, from not deformed samples retired to different depths during the construction of a well, where the probe rods of the TDR be installed. From the tests, polynomial equations had been gotten to relate the behavior of the variation of the period of time of the electromagnetic pulse covered by probe rods TDR with the variation of the humidity of the soil and Van Genuchten models (1980) to relate the humidity with ( $\psi$ ) and  $k(\psi)$ . The results had shown that, for the calibration of the humidity in this type of soils, a four-degree polynomial adjusted appears like the best alternative in relation to the existing expressions in places where these theories had been derived. Additionally, it was observed, that the biggest variations of ( $\psi$ ) and  $k(\psi)$  will occur between the saturation and 10% of humidity due to peculiarity of the retention curve. Finally, the present calibration is presented as an useful and practical expedient for hydrodynamic studies of unsaturated soils.

**Keywords:** calibration, reflectometer, content of water, unsaturated soil.

## INTRODUÇÃO

Mudanças no meio ambiente vêm alarmando e colocando em risco a humanidade. Esses problemas são provenientes de diversos fatores, a maioria devido a efeito antrópicos.

Um dos principais problemas está relacionado com a contenção e diminuição do  $\text{CO}_2$ , causador do denominado “efeito estufa”. A conservação de reservas de carbono nos solos, florestas e outros tipos de

vegetação, preservação de florestas nativas, implantação de florestas e sistemas agro-florestais e recuperação de áreas degradadas, são ações que contribuem com a redução do CO<sub>2</sub> na atmosfera.

Outro dos problemas refere-se à contaminação dos solos e águas superficiais ou subterrâneas com poluentes (orgânicos ou não) provenientes de derrames acidentais de produtos químicos, aplicação de fertilizantes e pesticidas ou fugas de tanques sépticos, de gasolina, entre outros.

Infelizmente, a redução de biomas e contaminação de sistemas naturais vem aumentando progressivamente. Em contrapartida, pesquisas destinadas a encontrar soluções que permitam a garantia da sustentabilidade do meio ambiente, minimizando ou revertendo esses problemas, estão sendo desenvolvidos atualmente. Estes estudos necessitam de diversas informações dentre elas, o conhecimento da dinâmica do fluxo da água entre a atmosfera e o solo. Particularmente, a hidrodinâmica na zona vadosa é um tema pouco estudado, provavelmente, devido à complexa teorização e procedimentos experimentais em laboratório ou *in situ*, que contribuem a que seja pouco investigado em diversas áreas de conhecimento.

Estudos de balanços hidrológicos podem ser realizados pela monitoração *in situ*. No entanto,

difícilmente tem se observado a monitoração da dinâmica da água no meio não saturado para esses fins. Particularmente, o estudo do fluxo não saturado pode ser realizado por monitoração da umidade em todo o perfil da zona vadosa. Para fazer isto possível, deve-se contar com equipamentos que tenham como principais características; a rapidez e precisão dos dados e capacidade de monitoração contínua durante o período hidrológico.

Vários são os equipamentos destinados a esses fins. No entanto, o TDR (*Time Domain Reflectometry*) se apresenta como uma técnica relativamente nova e capaz de eliminar algumas limitações em relação a outros métodos existentes. Além de cumprir com as necessidades para medição supracitadas (rapidez, precisão, medições contínuas em longos períodos), não é nocivo ao operador durante sua utilização (como o caso da sonda de nêutrons que emite radioatividade) e não é destrutivo.

O objetivo deste trabalho consiste em mostrar a calibração do equipamento baseado na técnica TDR para o estudo de algumas características hidrodinâmicas de um perfil de solo não saturado, submetido às condições naturais, destinado a auxiliar no conhecimento de processos hidrológicos e de transporte de contaminantes na zona vadosa.

## MÉTODOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS

### REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO

A técnica consiste na medida do tempo do trajeto de pulsos eletromagnéticos ao longo de uma linha de transmissão de hastes com comprimento conhecido. O tempo que leva a onda eletromagnética para ir e voltar na linha de transmissão é relacionado à constante dielétrica do meio no qual a sonda está inserida (Teixeira, 2001). A constante dielétrica do solo é uma medida de quanto um campo magnético externo é armazenado no interior de um material contido no respectivo campo. Este parâmetro ( $\epsilon$ ) é relacionado com a velocidade de propagação ( $V$ ) e a velocidade da luz no vácuo ( $3 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$ ) mediante a expressão (1):

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1)$$

Adicionalmente, ( $V$ ) pode ser expressa segundo a equação seguinte:

$$V = \frac{2L}{t} \quad (2)$$

onde:  $L$ (m) é o comprimento da linha de transmissão e  $t$ (s) o tempo empregado para percorrê-la.

Igualando-se as duas expressões têm-se:

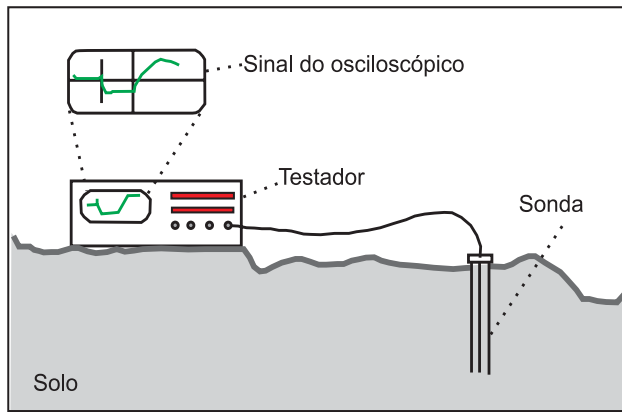
$$\epsilon = \left[ \frac{c \cdot t}{2L} \right]^2 \quad (3)$$

Da expressão (3) observa-se que a constante dielétrica pode ser obtida conhecendo o tempo de percurso do sinal e o comprimento da sonda, que é influenciado pelo tipo de material do condutor.

Na prática o aparelho (TDR) possui um testador ligado à linha de transmissão ou sonda. Um osciloscópio permite a visualização do sinal através de um gráfico, onde o eixo das abscissas representa o tempo de percurso e o eixo das ordenadas a voltagem do sinal. A Figura 1 mostra o esquema de um equipamento com testador de cabo marca *Tektronix* e sondas coaxiais com três hastes.

Alguns equipamentos mais modernos comercialmente disponíveis, ao invés de fornecerem o tempo de percurso do sinal, utilizam o comprimento da linha de transmissão ou chamado “comprimento virtual” e que utiliza a expressão (4) para determinação da constante dielétrica:

$$\epsilon = \left[ \frac{L_{\text{visor}}}{V_p \cdot L} \right] \quad (4)$$



**FIGURA 1.** Esquema do equipamento para a técnica TDR (Conciani et al., 1995).

onde:  $L_{\text{visor}}$  representa o comprimento de onda lida no aparelho;  $V_p$  a velocidade de propagação do sinal numa linha de transmissão dada como porcentagem da velocidade da luz no vácuo.

Na bibliografia especializada conta-se com estudos deste aparelho quanto a sua calibração. Topp et al. (1980) utilizaram uma sonda coaxial, ou seja, constituída por um cilindro externo, no qual o solo era introduzido, e uma haste interna. No comprimento do tubo cápsulas porosas permitiam a inserção ou retirada de água no solo. Da calibração, os autores puderam formular uma correlação empírica que relaciona a

constante dielétrica do solo com o teor de umidade volumétrica ( $\theta$ ) do mesmo, proveniente de cinco tipos de solos (desde argilosos até arenosos) expressa pela seguinte equação:

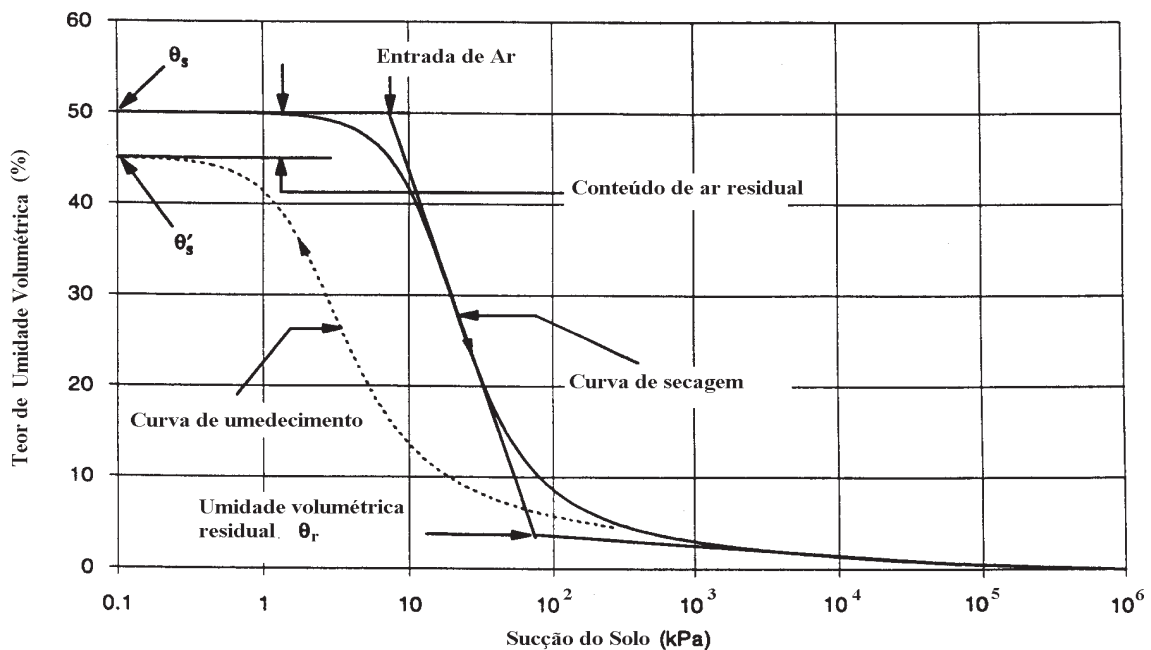
$$\theta = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,9 \cdot 10^{-2} \varepsilon - 5,5 \cdot 10^{-4} \varepsilon^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \varepsilon^3 \quad (5)$$

## RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

A relação entre o teor de umidade (gravimétrico  $w$ , volumétrico  $\theta$  ou grau de saturação  $S_r$ ) e a sucção do solo é uma característica do solo não saturado. Esta relação pode ser representada graficamente e denomina-se “curva de retenção da água no solo”. Segundo Fredlund et al. (1994), a curva de retenção pode ser definida como a variação da sucção com a capacidade de retenção da água nos macro e microporos no interior do solo.

Os valores correspondem ao tipo de solo, com uma densidade determinada, e a natureza dessa relação está diretamente associada a granulometria e mineralogia do solo. De uma forma geral, a geometria dos poros, a magnitude e composição mineralógica da fração fina são determinantes na posição relativa, forma e inclinação da curva.

A curva de retenção pode ser caracterizada com a finalidade de equacioná-la. A caracterização é feita a partir das trajetórias típicas obtidas através de procedimentos de secagem e umedecimento (Figura 2).



**FIGURA 2.** Elementos das curvas de retenção (Fredlund et al., 1994).

Onde,  $\theta_s$ : teor de umidade volumétrica de saturação para a curva obtida pelo processo de secagem;  $\theta'_s$ : teor de umidade volumétrica de saturação para a curva obtida pelo processo de umedecimento;  $\theta_s - \theta'_s$ : conteúdo de ar residual; Pressão de entrada de ar: sucção correspondente ao ponto de entrada de ar e  $\theta_r$ : teor de umidade volumétrica residual ou de umidade irreduzível e que corresponde ao menor raio de curvatura do menisco capilar.

Diversos autores têm proposto expressões matemáticas, com a finalidade equacionar a curva de retenção de água no solo. Estas equações têm sido empregadas na obtenção de outras propriedades (resistência, deformação e hidráulicas) dos solos não saturados mediante métodos indiretos.

Entre as equações mais empregadas podemos mencionar a equação de van Genuchten (1980) e que é dada por:

$$w = w_r + \frac{(w_s - w_r)}{(1 + (\alpha \cdot \psi)^n)^m} \quad (6)$$

onde:  $w$ ,  $w_s$ ,  $w_r$ , representam as umidades gravimétricas (%) para qualquer teor de umidade, do solo saturado e residual respectivamente;  $\alpha_v$ ,  $n$  e  $m$ , representam parâmetros do ajuste ( $\text{kPa}^{-1}$ );  $\psi$  a sucção matricial.

### Ensaio Para Medida da Sucção nos Solos

Existem diversos tipos de ensaios para a determinação da sucção do solo, e entre os mais usados encontra-se o método do papel filtro. O uso do papel filtro foi inicialmente proposto por Gardner (1937). O método consiste em colocar um papel filtro com características de retenção conhecida, numa vasilha hermética junto com uma amostra de solo. Quando se atinge equilíbrio de umidade, torna-se possível determinar a sucção do solo usando-se uma curva de calibração prévia do papel.

Os tipos de papéis mais usados são o Schleicher & Shuell N° 589 e o Whatman N° 42, (Marinho, 1994). O papel filtro pode ser usado para determinar a sucção matricial através do fluxo capilar, com um contato direto através das partículas do solo e do papel filtro, sem que a água perca continuidade implicando interação entre o papel filtro e a água do poro.

### CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE SOLOS NÃO SATURADOS

É chamado fluxo de água não saturado aquele que ocorre no solo em qualquer condição de teor de umidade menor que à de saturação. Na fase líquida de um solo não saturado, tanto a água como o ar, se movimentam pela influência dos potenciais presentes num meio não saturado.

Costuma-se admitir que o fluxo não saturado é descrito pela lei de Darcy, com a diferença de que a condutividade hidráulica não saturada  $k(\theta)$  ou  $k(\psi)$  não é constante e varia predominantemente em função do grau de saturação. Experiências de Richards (1931), Childs & Collis-George (1950), confirmaram que pode ser aplicado satisfatoriamente a solos não saturados. A lei de Darcy para o fluxo não saturado pode ser expresso como:

$$q = -k(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (7)$$

onde,  $k(\theta)$ : condutividade hidráulica não saturada (m/s);  $q$ : quantidade de fluxo não saturado que equivale à velocidade (ou densidade) de descarga (m/s);  $\theta$ : teor de umidade volumétrica ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ );  $z$ : coordenada de posição (m);  $\phi$ : potencial total do solo não saturado (m).

### Determinação do Coeficiente de Condutividade Hidráulica em Solos Não Saturados

Dentro dos métodos para a determinação da condutividade hidráulica não saturada encontram-se aqueles que são realizados através de ensaios de laboratório ou de campo, e os que se valem de formulações especialmente desenvolvidas para tal fim.

Técnicas de ensaios de laboratório podem ser consultadas em Klute (1965). Os ensaios de campo apóiam-se, em geral, nos ensaios de infiltração e utilizam em sua interpretação a equação geral de fluxo, resolvida para as condições de contorno requeridas.

Outra maneira para a determinação da função condutividade hidráulica não saturada é a partir de fórmulas empíricas que correlacionam a função com a curva de retenção de água no solo, que são medidos no campo ou laboratório.

Diversos autores têm proposto formulações alternativas para a função condutividade hidráulica. Muitas delas apóiam-se na curva de retenção de água no solo, como, por exemplo, a de van Genuchten (1980) que é dada pela seguinte expressão:

$$k = k_s [(\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)]^{1/2} \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right]^m \right\}^2 \quad (8)$$

onde,  $k$ : coeficiente de condutividade hidráulica não saturada;  $k_s$ : coeficiente de condutividade hidráulica saturada;  $\theta_s$ : teor de umidade volumétrica saturada;  $\theta_r$ : teor de umidade volumétrica residual;  $m$ : constantes.

## CALIBRAÇÃO DO APARELHO

O equipamento empregado foi da marca *Campbell Scientific Inc* (2003). Um detalhe sobre o equipamento e seus componentes é mostrado na Figura 3.

O equipamento está composto por um *datalogger* CR10X, cabos de transmissão com sondas CS616 no extremo, uma fonte de alimentação constituída por uma bateria de 12 volts. Complementarmente, o equipamento necessita de um computador para a captura e tratamento dos dados, por essa razão, vem dotado de um programa para comunicação e elaboração da rotina dos comandos para automatização da emissão e captura do sinal eletromagnético no *datalogger*.

A relação entre o sinal do aparelho com a umidade do solo, sucção matricial e condutividade hidráulica do solo não saturado foi obtida a partir de diversos ensaios de laboratório.

A primeira relação (sinal *versus* umidade do solo) foi determinada segundo procedimentos descritos no próximo item. No entanto, para a relação com as outras propriedades dos solos não saturados (sucção matricial

e condutividade hidráulica não saturada), foram necessários ensaios de retenção de água no solo e condutividade hidráulica do solo saturado respectivamente.

Adicionalmente, ensaios complementares tais como, granulometria, massas específicas e limites de consistência foram empregados para caracterização dos solos utilizados.

## Relação Entre o Sinal do Aparelho e Umidade do Solo

Foram realizados ensaios de laboratório que permitiram relacionar as leituras em tempo real do aparelho com a umidade do perfil de solo não saturado.

Para este procedimento foi necessário a retirada de amostras indeformadas cúbicas de 35 cm de aresta através de procedimentos sugeridos por Nogueira (1988) durante escavação do poço de monitoramento. A partir das amostras foram moldados corpos de prova de 35 cm de altura e 10 cm de diâmetro em cilindros de PVC, com a finalidade de servirem de porta amostra.

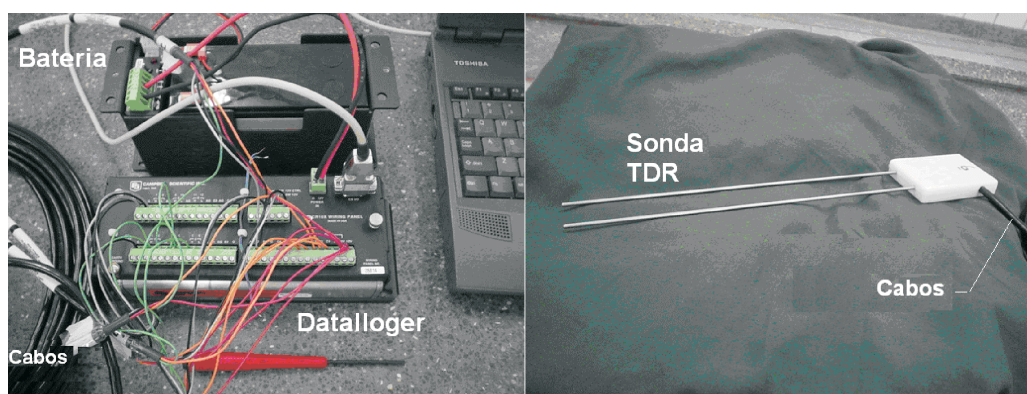


FIGURA 3. Equipamento TDR e seus componentes.

Obtidos os corpos de prova, estes foram levados à saturação segundo esquema da Figura 4A.

Uma vez alcançada a saturação do solo por capilaridade, as sondas foram inseridas no solo. O extremo das sondas foram conectadas ao *datalogger* (mediante os cabos de transmissão) e o *datalogger* por sua vez, ao computador e à fonte de energia (Figura 4B).

Inicialmente é pesado o conjunto de solo saturado e porta amostra ( $P_{ssat+c}$ ) na balança eletrônica (vide Figura 4B). A partir deste momento é permitida a secagem do solo ao ar acompanhado de leituras do sinal na aquisição de dados, e simultaneamente pesagens sucessivas ( $P_{su+c}$ ) para determinação do teor de umidade ( $w$ ), que foi calculado mediante as expressões abaixo indicadas:

$$w = \frac{[P_{ssat} - (P_{(ssat+c)} - P_{(su+c)}) - P_{ssec o}]}{P_{ssec o}} \times 100 \quad (9)$$

$$P_{ssat} = P_{(ssat+c)} - P_c \quad (10)$$

$$P_{ssec o} = \frac{P_{sunat}}{(1 + w_{nat} / 100)} \times 100 \quad (11)$$

onde,

$P_{ssat}$  : Peso do solo saturado;  $P_{ssec o}$  : Peso do solo seco;  
 $P_{sunat}$  : Peso do solo com umidade natural;  $P_{su}$  : Peso do solo úmido;  $P_c$  : Peso da sonda, recipiente e tubo porta-amostra;  $w_{nat}$  : Umidade natural do solo.

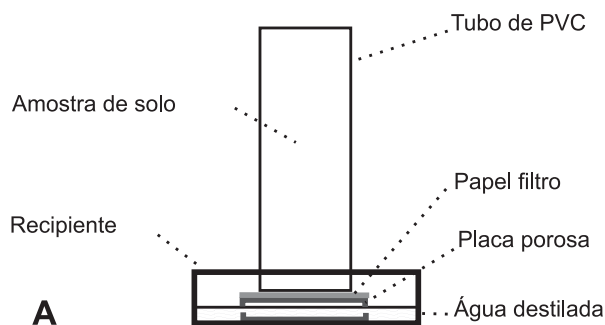


FIGURA 4. (A) Detalhe da saturação do corpo de prova., (B) Sistema de calibração.

Finalizada essa etapa foram relacionados os dados de teor de umidade e suas respectivas leituras do sinal, sendo que, este equipamento, fornece resultados do período de tempo (microsegundos) percorrido pela onda eletromagnética para ir e voltar na linha de transmissão. Essa relação foi representada num gráfico e os dados experimentais foram ajustados por regressão, obtendo-se assim, uma expressão matemática que permitirá a obtenção da umidade a partir do sinal adquirido quando a sonda for instalada no campo.

#### Relação Entre o Sinal do Aparelho e a Sucção do Solo

A obtenção da sucção no campo a partir das leituras em tempo real obtidas no reflectômetro é possível ao relacionar a umidade (que pode ser obtida da calibração do sinal *versus* umidade gravimétrica mostrada no item anterior) com a sucção do solo. A relação foi obtida mediante a execução de ensaios de curva de retenção de água no solo segundo a técnica do papel filtro, cujo procedimento é mostrado a seguir.

#### Ensaio para Determinação da Curva de Retenção pelo Método do Papel Filtro

Para o ensaio foram moldados corpos de prova (de 5 cm de diâmetro e 1 cm de altura) a partir dos blocos indeformados (retirados durante a escavação do poço).

O início da curva de retenção foi a partir da condição de saturação, portanto, os corpos de prova foram assentados num papel filtro e o conjunto posto sobre uma placa porosa que se encontrava parcialmente submersa em água destilada. O tempo de imersão para saturar as amostras foi de 24 horas.

Após saturação, os corpos de prova foram deixados secar até atingir o teor de umidade desejado (calculado previamente) e controlado por pesagens sucessivas.

Uma vez atingido o teor de umidade desejado foi colocado, sobre cada superfície da amostra, um papel filtro com diâmetro menor em contato direto com o solo. O conjunto foi embrulhado hermeticamente com um filme plástico e firmemente envolto com uma fita adesiva para garantir um contato firme entre papel-solo. A Figura 5 apresenta um esquema do arranjo empregado.

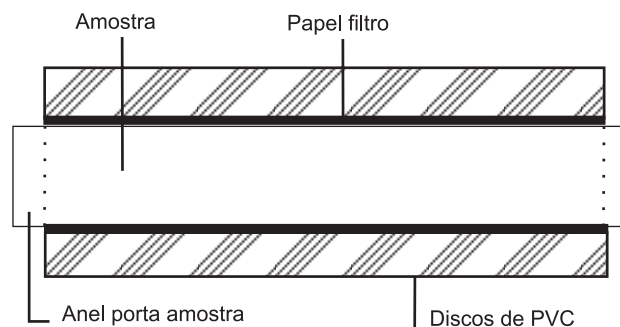


FIGURA 5. Arranjo empregado para determinação da sucção matricial do solo (Alfaro Soto, 2004).

O tempo estimado para atingir o equilíbrio de umidade entre o papel e o solo foi de 10 dias. Após este período, os papéis foram retirados e pesados imediatamente (balança com resolução de 0,0001 g) sendo colocados na estufa para secagem (tempo mínimo de 2 horas) e posteriormente pesados, sempre evitando a variação da umidade. Com a amostra de solo correspondente determinou-se o teor de umidade.

Calcularam-se as umidades de equilíbrio dos papéis e do solo de cada amostra, onde para cada umidade do solo corresponde uma sucção matricial que foi determinada a partir da umidade do papel, utilizando as curvas de calibração para o papel filtro Whatman N° 42 obtidas por Chandler et al. (1992) e que são mostradas a seguir:

$$\psi = 10^{6,05 - 2,48 \log w} \quad w \geq 47\% \quad (12)$$

$$\psi = 10^{4,84 - 0,0622w} \quad w < 47\% \quad (13)$$

onde  $\psi$ : Sucção matricial (kPa);  $w$ : Teor de umidade de equilíbrio do papel (%).

Após obtenção da curva de retenção foi realizado um ajuste por regressão não linear, empregando para esse objetivo o modelo proposto por van Genuchten (1980) e que é dada pela equação (6).

### Relação entre o Sinal do Aparelho e Condutividade Hidráulica do Solo Não Saturado

De forma análoga à anterior, a determinação da condutividade hidráulica do solo não saturado com base na umidade (obtida pela primeira relação dada pelo sinal *versus* umidade gravimétrica) foi possível a partir de métodos indiretos tal como mostrados anteriormente

A equação empregada para este trabalho está baseada no modelo empírico de van Genuchten (1980), e que é representada pela equação (8). Os parâmetros  $m$ ,  $\theta_r$  e  $\theta_s$  da equação são os mesmos obtidos quando do ajuste da curva de retenção e  $k$  a condutividade hidráulica saturada obtida pelos ensaios a carga constante valendo-se de permeâmetros. Desta forma, substituindo esses valores na equação (8) estaremos

em condições de determinar a condutividade hidráulica não saturada para qualquer valor de umidade do solo medidas *in situ* pelo reflectômetro.

### Ensaio Complementares

Foram realizados ensaios complementares, com a finalidade de caracterizar fisicamente os materiais empregados para o presente estudo (massa específica, limites de consistência e granulometria), bem como, para servirem de auxílio na quantificação de outros parâmetros dos solos não saturados por métodos indiretos (condutividade hidráulica do solo saturado).

Os diversos ensaios de caracterização foram realizados segundo as Normas ABNT, como mostrado no quadro abaixo:

Ensaio de granulometria conjunta	⇒	ABNT-NBR 7181/84
Massa específica dos solos	⇒	ABNT-NBR 6508/84
Limites de liquidez	⇒	ABNT-NBR 6459/84
Limite de plasticidade	⇒	ABNT-NBR 7180/84

Os ensaios para determinação do coeficiente de condutividade hidráulica saturada no laboratório, foram realizados a carga constante segundo o procedimento sugerido por Stancati et al. (1981).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### DESCRIÇÃO DO SOLO ESTUDADO

O material estudado é o solo residual da formação Rio Claro. No local de onde o material foi retirado serão instaladas as sondas ao longo do perfil da zona vadosa dentro de um poço de monitoramento, que está localizado no Campus da UNESP de Rio Claro (Bela Vista), em frente ao Laboratório de Estudo de Bacias (LEBAC).

Na Tabela 1 são resumidos alguns parâmetros geotécnicos dos solos estudados.

A partir da Tabela 1, como se pode observar, todos os solos podem ser classificados, segundo a escala ABNT, como areia siltosa. No entanto, observou-se também que a porcentagem de areia grossa e argila tende a aumentar a partir dos 5 m de profundidade e ao longo do perfil do solo, respectivamente. Os demais índices indicam valores típicos de material arenoso. Particularmente, se observou maior massa específica seca, menor índice de vazios e condutividade hidráulica

TABELA 1. Resultados de caracterização dos solos.

Prof. (m)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	W <sub>L</sub> (%)	W <sub>P</sub> (%)	IP (%)	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	k (cm/s)	Textura (ABNT)
1 m	0,02	24,06	8,67	23,7	16,14	7,56	25,8	15,0	0,72	6,14E-04	Areia siltosa
2 m	0,01	23,74	10,54	29,2	22,16	7,04	26,0	13,1	0,98	3,20E-03	Areia siltosa
3 m	0,10	23,33	12,32	26,7	25,28	1,42	26,1	14,1	0,85	4,37E-03	Areia siltosa
4 m	0,01	25,07	14,32	29,2	28,21	0,99	24,9	13,2	0,89	5,05E-03	Areia siltosa
5 m	0,13	20,84	18,02	26,5	18,08	8,42	26,2	13,5	0,94	5,76E-04	Areia siltosa
6 m	0,33	20,87	18,45	31,1	-	NP	26,2	13,6	0,93	1,15E-03	Areia siltosa

Onde: w<sub>L</sub>: limite de liquidez; w<sub>P</sub>: limite de plasticidade; IP: índice de plasticidade;  $\gamma_s$ : peso específico dos sólidos;  $\gamma_d$ : peso específico do solo seco; e: índice de vazios; NP: não plástico.

saturada a 1 m de profundidade, o que deve estar relacionado com a provável compactação do solo devido à passagem eventual de veículos ou maquinarias.

## ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

Os resultados de ensaios de curva de retenção pelo método do papel filtro são resumidos no gráfico da Figura 6. Tal como esperado, os resultados mostram-se coerentes com a porcentagem da fração argila encontrada com a maioria dos materiais, isto é, os solos retêm menores teores de água (%) quando estes possuem menor fração argila e vice-versa.

Adicionalmente, a partir desta Figura, se observa que todas as curvas de retenção seguem uma distribuição bimodal, provavelmente devido a uma uniformidade de poros do solo entre 10 e 1000kPa, tal como já observado por Alfaro Soto (2004), e que deve ocorrer na maioria de solos brasileiros.

A partir dos dados experimentais procedeu-se à determinação do ajuste dos dados por regressão não linear (mostrados na Figura 6), mediante o modelo de

van Genuchten (1980), onde os parâmetros fornecidos pelo mencionado ajuste são mostrados na Tabela 2.

Da Tabela se observa que os resultados de ajuste podem ser considerados como satisfatórios, pois o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) mostram-se próximos da unidade.

## CALIBRAÇÃO DO REFLECTÔMETRO

### Obtenção da Relação do Sinal versus Umidade do Solo

O tempo ocupado para a calibração do equipamento foi o necessário para fazer variar a umidade (por secagem ao ambiente) das amostras de solo desde a saturação até umidades próximas aos 7%. Isto com a finalidade de se obter uma faixa de variação que permita avaliar o desempenho do equipamento para medições em solos, com umidade relativamente baixa, dado que diversos autores apontam essas inconveniências como uma das dificuldades provenientes da utilização deste método. A Figura 7 mostra o tempo empregado para execução da calibração nas diferentes amostras de solo.

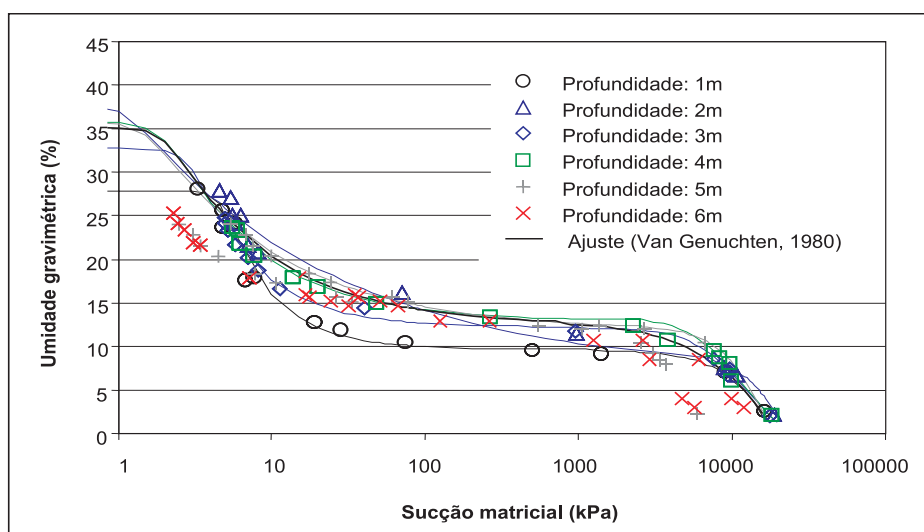


FIGURA 6. Curvas de retenção de água no solo.

TABELA 2. Parâmetros de ajuste da curva retenção.

Solo N°	$w_s$ (%)	$w_r$ (%)	$\alpha$ (kPa <sup>-1</sup> )	$n$ (-)	$m$ (-)	$r^2$ (-)
1	27,80	9,70	0,2225	10,8670	0,1220	0,933
2	38,10	7,10	0,9345	4,6562	0,0704	0,969
3	32,70	12,20	0,3466	7,2359	0,1470	0,992
4	35,70	12,90	0,5016	5,3183	0,1372	0,994
5	35,90	11,80	0,6688	4,8787	0,1056	0,998
6	35,20	12,40	0,5063	6,0534	0,1076	0,995



A partir dos resultados de umidade (%) versus período (microsegundos), como já mostrado anteriormente, procedeu-se a obtenção dos gráficos e ao ajuste das curvas de calibração por regressão. Os gráficos resumindo os resultados experimentais e ajustados encontram-se na Figura 8.

Foram testados vários modelos de ajuste por regressão aos dados experimentais obtidos na calibração. Dos modelos testados obteve-se um melhor coeficiente de determinação quando foi utilizando uma equação polinomial de quarto grau. Dessa forma a umidade do solo (%) pode ser obtida a tempo real quando realizada a leitura do sinal fornecido pelo aparelho (período de tempo em microsegundos) quando

as sondas encontrarem-se instaladas no poço de monitoramento mediante a relação (14):

$$w = C_1 T^4 + C_2 T^3 + C_3 T^2 + C_4 T + C_5 \quad (14)$$

onde  $w$  representa o teor de umidade (%);  $T$ : o período (micro-segundos) e  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$ : constantes do ajuste por regressão.

Os parâmetros de ajuste com os coeficientes de determinação obtidos para cada amostra encontram-se na Tabela 3.

Dos resultados mostrados na Tabela 3, pode-se observar que o ajuste é muito satisfatório onde em todos os casos os coeficientes de determinação foram praticamente iguais à unidade.

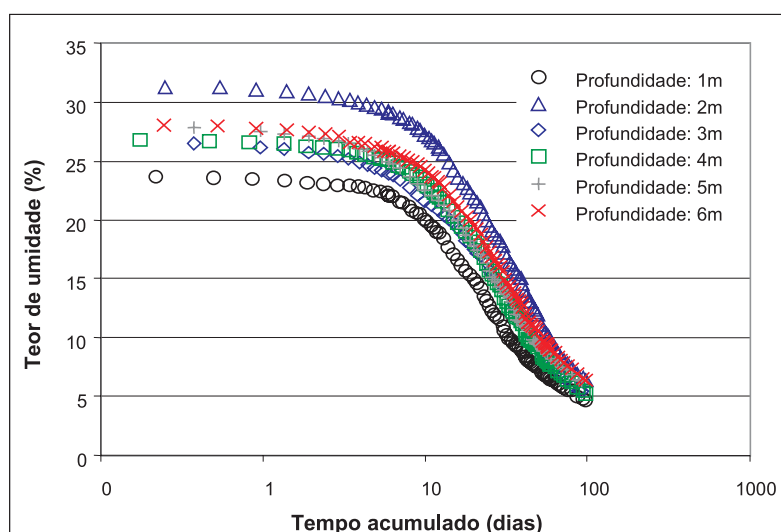


FIGURA 7. Variação da umidade no decorrer dos dias de calibração.

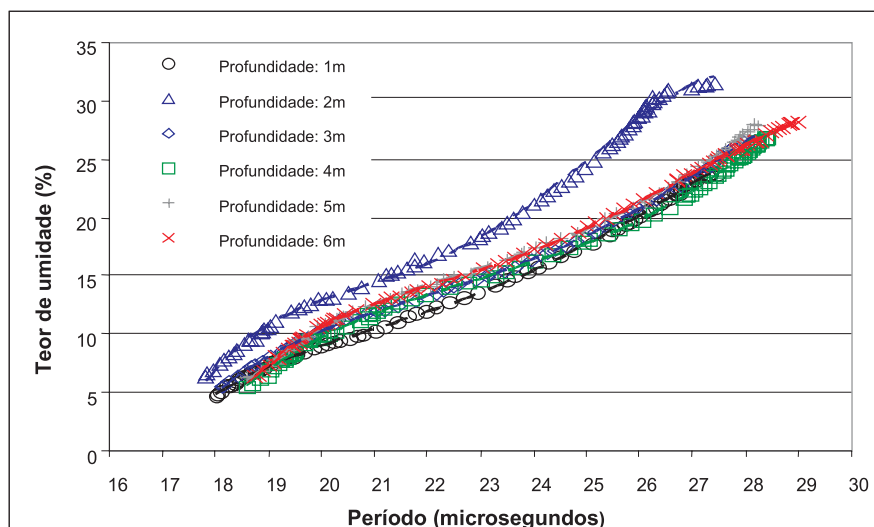


FIGURA 8. Curva de Calibração do reflectômetro relacionando teor de umidade versus período.

TABELA 3. Dados da Calibração do reflectômetro.

Solo N°	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	r <sup>2</sup>
1	-0,0031	0,2999	-10,638	167,14	-978,11	0,9994
2	-0,0130	1,1941	-40,740	614,41	-3451,80	0,9980
3	-0,0029	0,2884	-10,704	175,54	1068,20	0,9996
4	-0,0005	0,0787	-3,8839	78,93	-566,75	0,9994
5	-0,0024	0,2599	-10,247	177,56	-1135,90	0,9994
6	-0,0058	0,5722	-20,914	338,65	2043,40	0,9997

Cabe ressaltar que modelos para ajuste dos dados experimentais empregados por outros autores são na sua maioria dados por uma equação polinomial de terceiro grau. Isto talvez, porque as faixas de umidade para a calibração são menores as realizadas neste trabalho (até 15% de umidade) ou devido à natureza do solo empregado.

#### Obtenção da Relação do Sinal do Aparelho versus Sucção Matricial do Solo e Condutividade Hidráulica do Solo Não Saturado

A obtenção da sucção do solo mediante uso do reflectômetro consiste em princípio na determinação da umidade segundo a calibração da equação 6. Assim, com os valores de umidade serão determinadas as sucções correspondentes mediante os gráficos de curvas de retenção da Figura 6.

A determinação direta da sucção a partir da leitura do sinal do reflectômetro não foi possível devido a que

o modelo matemático de van Genuchten (1980) para o ajuste da curva de retenção, descreve a umidade em função da sucção matricial do solo ( $w=f(\psi)$ ), ou seja, é necessário *a priori* o conhecimento do valor da sucção matricial para a determinação da umidade do solo. Já o reflectômetro fornece inicialmente o resultado da umidade do material.

Na Figura 9, são mostrados os resultados gráficos da relação entre a umidade do solo e a condutividade hidráulica do solo não saturado, onde cada curva corresponde a cada solo em diferentes profundidades e que seguem trajetórias definidas pela equação 8.

A obtenção da condutividade hidráulica não saturada será imediata a partir do valor de umidade do solo proveniente do reflectômetro com auxílio da equação acima mencionada e cujos parâmetros, para cada solo (provenientes de ensaios de retenção de água no solo e condutividade hidráulica do solo saturado), encontram-se resumidos na Tabela 4.

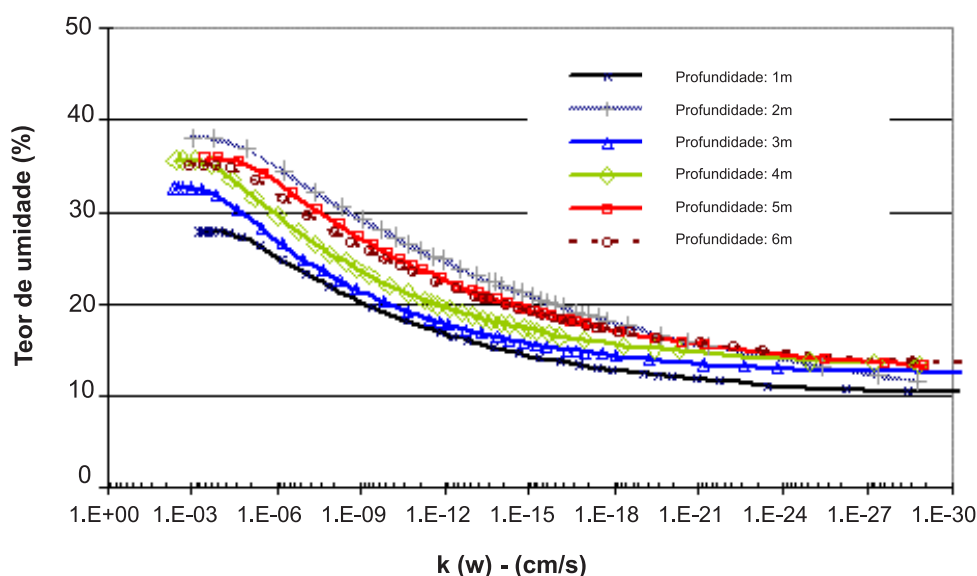


FIGURA 9. Umidade gravimétrica do solo versus condutividade hidráulica do solo não saturado.

TABELA 4. Parâmetros da função condutividade hidráulica não saturada.

Solo N°	k (%)	w <sub>s</sub> (%)	w <sub>r</sub> (%)	m (-)
1	6,14E-04	27,80	9,70	0,1220
2	3,20E-03	38,10	7,10	0,0704
3	4,37E-03	32,70	12,20	0,1470
4	5,05E-03	35,70	12,90	0,1372
5	5,76E-04	35,90	11,80	0,1056
6	1,15E-03	35,20	12,40	0,1076

Dos gráficos se observa que a máxima variação da condutividade hidráulica do solo não saturado, ocorre desde a condutividade saturada até aproximadamente

$1 \times 10^{-30}$  cm/s na maioria dos solos, quando o teor de umidade varia desde a saturação até aproximadamente 10% respectivamente.

## CONCLUSÕES

Neste trabalho mostraram-se aspectos da calibração de um reflectômetro para seu emprego na determinação *in situ* da umidade do solo e adicionalmente da sucção matricial e condutividade hidráulica não saturada de um perfil de solo natural localizado numa zona vadosa.

A calibração do reflectômetro permitiu observar que para este tipo de solos a relação entre o sinal e a umidade do solo obtida nos resultados experimentais poderiam ser melhor ajustados a uma tendência polinomial de quarto obtendo-se assim melhores coeficientes de determinação provenientes da regressão. Provavelmente este comportamento possa ser característico de solos tropicais, porém será necessário maiores estudos para elucidar esse fato.

Das calibrações realizadas para determinação da sucção e da condutividade hidráulica do solo não saturado se observou que as máximas variações dessas

duas propriedades ocorrerão desde a saturação do solo até atingir uma umidade de aproximadamente 10%. Esse fato deve-se a que a curva de retenção apresenta uma uniformidade dos tamanhos dos poros entre 10 e 1000kPa de sucção e que ocorre quando o solo se encontra próximo a esse valor de umidade.

Finalmente, a calibração deste equipamento se apresenta como uma ferramenta útil na determinação das propriedades aqui avaliadas e que pode ser empregada em solos tropicais com características similares o que constitui não somente um expediente útil e prático para medição da umidade em tempo real, mas também, para medição da sucção matricial e a condutividade hidráulica do solo não saturado, sendo estes parâmetros, dificilmente medidos na prática devido a sua complexa teorização, instrumentação e operacionabilidade em equipamentos convencionais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. MB-30 NBR 6459: **Solo-Determinação do limite de liquidez**, 1980.
2. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. MB-31 NBR 7180: **Solo-Determinação do limite de plasticidade**, 1982.
3. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. MB-28 NBR 6508: **Determinação da massa Específica**, 1984.
4. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. MB-32 NBR 7181: **Solo-Análise Granulométrica**, 1984.
5. ALFARO SOTO, M.A.A. **Comparação entre métodos de imposição e de controle da sucção em ensaios com solos não saturados**. São Carlos, 2004. 206 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
6. CHANDLER, R.J.; CRILLY, M.S.; MONTGOMERY-SMITH, G. Low cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. **Proceedings of Institution of Civil Engineers**, v. 92, p. 82-89, 1992.
7. CHILDS, E.C. & COLLINS-GEORGE, N. The permeability of porous materials. **Proceedings of the Royal Society of London**, n. 201, p. 392-405, 1950.
8. CONCIANI, W.; HERMANN, P.S.; SOARES, M.M. The time domain reflectometry to study matrix suction. In: CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 1, 1995, Paris. **Proceedings...** Rotterdam, A. A. Balkema, 1995, v. 3, p. 1481-1486.
9. FREDLUND, D.G.; XING, A.; HUANG, S. Predicting the permeability functions for unsaturated soil using the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 4, p. 533-546, 1994.

10. GARDNER, W.R. A method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range. **Soil Science**, v. 43, n. 4, p.277-283, 1937.
11. KLUTE, A. Water Diffusivity. In: Methods of Soils Analysis, **Journal of Agronomy**, p. 262-272., 1965.
12. MARINHO, F.A.M. Medição de sucção com o método do papel de filtro. In: COBRAMSEF, 10, 1994, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro, 1994, v. 2, p. 515-522.
13. NOGUEIRA, J.B. **Mecânica dos solos**. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 197 p., 1988.
14. RICHARDS, B.G. Capillary conduction of liquids through porous medium. **Physics**, v. 1, p. 318-333, 1931.
15. STANCATI, G.; NOGUEIRA, J.B.; VILAR, O.M. **Ensaio de laboratório em Mecânica dos Solos**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 208 p., 1981.
16. TEIXEIRA, C.F.A. **Desempenho do tensiômetro com manômetro de mercúrio, reflectômetro no domínio tempo e sonda de nêutrons no monitoramento do teor de água no solo**. Piracicaba, 2001. 115 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz”, ESALQ.
17. TOPP, G.C.; DAVIS J.L.; ANNAN A.P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission line. **Water Resources Research**, v. 16, p. 574-582, 1980.
18. Van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.
19. WATER CONTENT REFLECTOMETERS INSTRUCTION MANUAL. **Instruction manual: revision 4/03**; Copyright©2002-2003, Campbell Scientific. Disponível em: <http://www.campbellsci.com>. Acesso em julho2003.

*Manuscrito Recebido em: 25 de novembro de 2007  
Revisado e Aceito em: 15 de fevereiro de 2008*