



**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMAS  
TÊNSIOMÉTRICOS NA DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES  
HIDRÁULICAS DE SOLOS NÃO SATURADOS**

LUIZ ANTONIO CARVALHO LOPES JUNIOR

Engenharia Ambiental

Geotecnia Ambiental

Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rua Marques de São Vicente, 225 –  
Gávea – CEP .22.453-900 – Rio de Janeiro – Brasil .Tels. (21) 3114-1190 / 3114-  
1191 – Fax: 3114-1195

Rio de Janeiro, 09 de Julho de 2006.

<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>3</b>
<b>HISTÓRICO .....</b>	<b>5</b>
1.1 – HISTÓRICO DO ESTUDO DE SOLOS NÃO SATURADOS E TÊNSIOMETRIA.....	5
<b>EFEITOS RELEVANTES EM SOLOS NÃO SATURADOS .....</b>	<b>7</b>
2.1 – SOLO E SUAS INTERAÇÕES.....	7
2.2 – RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO .....	8
2.2.1 – <i>Adsorção</i> .....	8
2.2.2 – <i>Efeito capilar no solo</i> .....	9
2.5 – MENISCOS CAPILARES.....	11
2.6 – A ÁGUA CAPILAR NOS SOLOS.....	12
2.7 – MENISCOS CAPILARES INDEPENDENTES DO NÍVEL DE ÁGUA.....	13
<b>PROPRIEDADES RELEVANTES DE SOLOS NÃO SATURADOS.....</b>	<b>15</b>
3.1 – OS SOLOS NÃO SATURADOS E SUAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS.....	15
<b>EQUIPAMENTOS E MÉTODOS UTILIZADOS PARA DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DE SOLOS NÃO SATURADOS.....</b>	<b>17</b>
4.1 – TENSÍÔMETRO.....	17
4.2 – SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS .....	19
4.3 - PERMEÂMETRO DE GUELPH.....	20
4.4 - MÉTODO DO PAPEL FILTRO .....	21
<b>TÉCNICAS DE ENSAIOS EM CAMPO E LABORATÓRIO.....</b>	<b>22</b>
5.1 – ENSAIOS REALIZADOS.....	22
5.2 - MATERIAIS E MÉTODOS .....	23
5.3 - RESULTADOS.....	27
<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>37</b>
RECOMENDAÇÕES A FUTUROS ENSAIOS.....	38
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>39</b>

## Introdução

O estudo das propriedades de solos não saturados é de grande importância em vários tipos de projetos de engenharia<sup>1</sup>. Entre esses destaco os projetos de pesquisa nas áreas de estabilidade de talude e encostas, de determinação de plumas e contaminantes no solo e, ainda, na área de barragens de rejeitos industriais e de aterros sanitários.

Neste trabalho, o foco será uma das áreas de pesquisa que é desenvolvida pelo setor de geotecnia ambiental do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, a saber: o monitoramento de cargas de pressões negativas e a determinação de propriedades hidráulicas de solos não saturados, tais como: curva de retenção de água, permeabilidade saturada e não saturada com utilização de tensiômetros e permeômetros nos ensaios de laboratório e de campo. Estes instrumentos são de grande eficácia para a área de estudo em questão, uma vez que permitem que os mesmos sejam adaptados a sistemas de aquisição de dados, bem como que tais dados sejam mais rapidamente determinados, diferentemente de outras técnicas usuais como por exemplo, a técnica do papel filtro<sup>2</sup>, das placas de pressão ou das panelas de Richard.

O conhecimento das propriedades hidráulicas do solo é fundamental para os estudos de previsão do movimento da água do subsolo, em especial nas encostas, de modo a se monitorar sua estabilidade. Sendo a cidade do Rio de Janeiro um local onde é muito comum a presença de taludes e encostas parcialmente saturadas, onde a água encontra-se sob pressões negativas, a coesão deste solo ou sua sucção é favorecida. Entretanto no período das chuvas, como há grande infiltração de água no solo, estas

---

<sup>1</sup> Cf: T.M.P de Campos & E. A. Vargas Jr. (1997).

<sup>2</sup> Fernando A.M. Marinho. *Sucção com Método do Papel Filtro*.

pressões diminuem muito, podendo até mesmo a desaparecer. Conseqüentemente o solo perde a resistência acarretando os deslizamentos de encostas, sendo fundamental o serviço de monitoramento das mesmas.

O equipamento desenvolvido na PUC-Rio, conhecido como tensiômetros automáticos, foi iniciado por Peter Fleming em 1994, e continua sendo estudado de modo a possibilitar seu aprimoramento para aquisição de dados.

Este projeto situa-se no âmbito dos mencionados estudos de aprimoramento do uso equipamento para servir de banco de dados nas áreas de interesse de solos parcialmente saturados. Para tanto, foram realizados ensaios no período de março de 2005 até junho de 2006, por meio da metodologia de relacionar sucção no solo com sua umidade volumétrica.

Esta monografia dividiu-se em 6 capítulos. O capítulo 1 apresenta um breve histórico de como surgiu o interesse de estudar propriedades hidráulicas de solos não saturados, e os equipamentos desenvolvidos até em então.

O capítulo 2 e 3 apresentam os efeitos e as propriedades relevantes no estudo de propriedades hidráulicas de solos parcialmente saturados. Por um lado são apresentados os seguintes efeitos, sucção, capilaridade e adsorção; e por outro lado, as seguintes propriedades, curva característica e permeabilidade.

No capítulo 4, são apresentados os equipamentos e métodos utilizados e seu funcionamento, tais como, tensiômetro, permeômetro de Ghelph, equipamento de aquisição de dados e o método do papel filtro.

O capítulo 5 apresenta as técnicas e procedimentos utilizados em campo e em laboratório. Ainda no capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos neste trabalho, bem como a respectiva discussão. Por fim, no capítulo 6, são apresentadas as considerações finais.

## Histórico

### 1.1 – Histórico do estudo de solos não saturados e tensiometria

A agricultura foi a área que iniciou os estudos sobre os solos não saturados. Este campo de estudo buscava entender as interações da planta com o solo e o ar em regiões de não saturação de água. Foi necessário, então, que se criasse uma metodologia prática para entender como a retenção de água podia afetar o comportamento e o desenvolvimento das plantas.

Primeiramente, percebeu-se que a retenção de água pelo solo podia ser descrita como relação de umidade por sua sucção. Tal processo passou a ser designado como sucção ou “tensão capilar”<sup>3</sup>.

Deste modo, foram desenvolvidos alguns aparelhos para se medir o parâmetro de sucção do solo. Inicialmente, esses foram denominados como de “potenciômetros capilares”<sup>4</sup> “higrômetros” e “medidores de umidade do solo”<sup>5</sup>. Posteriormente, essas denominações foram deixadas de lado e o nome “tensiômetro” foi adotado, pois esse descreveria mais claramente sua função<sup>6</sup>.

Ao longo do tempo, esses aparelhos de medição foram aperfeiçoados com o avanço da eletrônica. Inicialmente, a maior dificuldade encontrada foi o tempo de resposta muito lento desses aparelhos. Tal problema vem sendo contornado com as modernas tecnologias que, a cada dia, possibilitam desenvolver dispositivos de leitura – transdutores - de pressão mais sensíveis.

---

<sup>3</sup> Gardner W, 1919 *apud* Fleming, M. P. 1994.

<sup>4</sup> Gardner et al, 1922 *apud* Fleming, M. P. 1994.

<sup>5</sup> Rogers, 1935 *apud* Fleming, M. P. 1994.

<sup>6</sup> Richards e Gardner, 1936 *apud* Fleming, M. P. 1994

Resumidamente, o tensiômetro (figura 8) pode ser descrito como uma pedra porosa de alta pressão de ar, conectada a um reservatório de água, que possibilita medir a variação da sucção do volume de água no reservatório. Isto é possível através de um medidor de pressão – como por exemplo, coluna de mercúrio, transdutor de pressão, etc. Esse aparelho será descrito com detalhes no capítulo 4.

Com o aperfeiçoamento do mecanismo de leitura, por meio da eletrônica e do uso de computadores, foi possível a utilização de dispositivos de aquisição de dados para o monitoramento de uma determinada região, com uso de vários tensiômetros simultaneamente.

## **Efeitos relevantes em solos não saturados**

### **2.1 – Solo e suas interações**

O solo pode ser constituído de partículas de animais e vegetais, componentes ativos e inertes, e suas reações acontecem tanto física como quimicamente. As alterações que nele ocorrem podem ser influenciadas pelos organismos presentes no solo e pelo tempo de exposição a tais componentes.

A fim de simplificar o entendimento das interações do solo, pode-se dizer que o mesmo se constitui de um sistema trifásico de partículas – ou seja, o solo –, água e ar. Nesse caso, o solo é considerado não saturado. Porém, caso seu sistema seja bifásico, isto é, com a presença apenas do solo e da água, esse é considerado como sistema saturado.

No fenômeno da não saturação, a água ou outro líquido é responsável pela geração de uma pressão abaixo da pressão atmosférica, chamada de sucção. Isto acontece quando a água entra em contato com o solo, e as forças químicas de adesão fazem com que a superfície livre da água forme uma curvatura, que depende do tipo de material e de seu grau de limpeza (figura 1 e 2).

Quanto maior a curvatura, maior será esta diferença de pressão (pressão atmosférica menos pressão matricial), e esta é usualmente medida em unidades de kPa, atm e bars.

## **2.2 – Retenção de água no solo**

São inúmeros os mecanismos em que a água é retida no solo, os quais são advindos das interfaces gasosa-líquida e sólida-líquida, e que criam forças que agem no sentido contrário à força da gravidade. Os principais mecanismos de interesse de estudo são os de adsorção de água na superfície das partículas e o efeito capilar da água nos poros do solo.

### **2.2.1 – Adsorção**

Adsorção é o processo pelo qual uma ou mais substâncias (sólida ou líquida) adere-se a outra (sólida) química ou fisicamente. Quando este fenômeno acontece quimicamente, a substância aderida reage quimicamente ao adsorvente, formando uma camada de uma nova substância. Pelo processo físico, o material adsorvido não reage, e este está sob a força de Van der Waals.

Os minerais argílicos, como por exemplo, as montmorilonitas, têm suas partículas compostas por placas moleculares ou treliças separadas por camadas de água. Estas partículas de argila possuem superfícies carregadas negativamente<sup>7</sup>. Tais superfícies atraem água, denominada água adsorvida, com uma energia de atração que é função da distância da água à superfície da argila.

---

<sup>7</sup> Richards, 1974 *apud* Fleming, M. P. 1994

### 2.2.2 – Efeito capilar no solo

Uma das características da água é o fato dela ter um comportamento diferenciado na superfície quando em contato com o ar, em virtude da orientação das moléculas que nela se posicionam, ao contrário do que ocorre no interior da massa, onde as moléculas estão envoltas por outras moléculas de água em todas as direções, como indicado na Figura 1. Em consequência, a água apresenta uma *tensão superficial*, que é associada, por analogia, a uma tensão de membrana, já que seus efeitos são semelhantes.

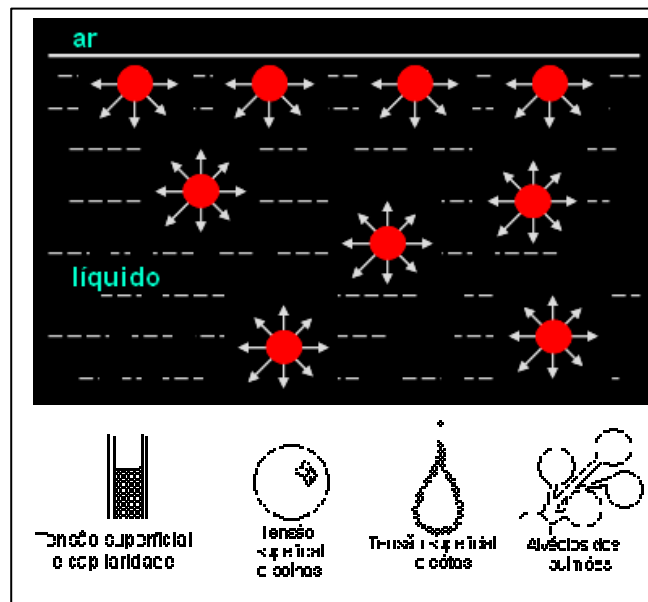


Figura 1.

Quando a água, ou outro líquido, fica em contato com um corpo sólido, as forças químicas de adesão fazem com que a superfície livre da água forme uma curvatura que depende do tipo de material e de seu grau de limpeza. No caso do vidro limpo, a superfície curva fica tangente à superfície do vidro, como se mostra na Figura 2.

Quando uma membrana flexível se apresenta com uma superfície curva, existe uma diferença de pressão atuando nos dois lados da membrana. Isto ocorre também no caso da superfície água-ar, em virtude da tensão superficial. Conforme sugere a Figura 2, a diferença entre as tensões nos dois lados é equilibrada pela resultante da tensão superficial. Assim, a pressão interna é maior do que a externa. Quanto maior a curvatura, maior a diferença entre as pressões. Portanto, sabendo-se a geometria e a tensão superficial do líquido é possível calcular esta diferença.

Um bom exemplo deste comportamento pode ser dado com um tubo capilar. Ao se colocar o tubo em contato com a superfície livre da água, esta sobe até atingir uma posição de equilíbrio (figura 2). A subida da água é resultante do contato vidro-água-ar e da tensão superficial da água.

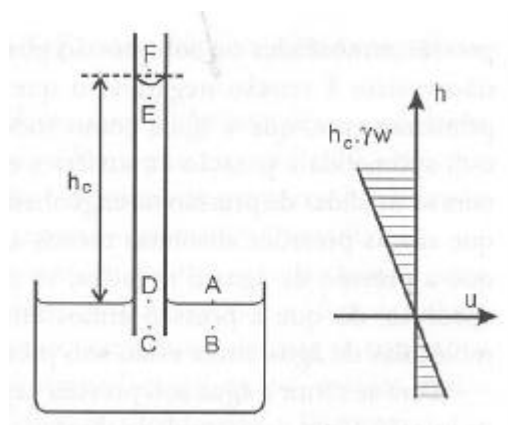


Figura 2: Ascensão capilar.

A altura de ascensão capilar pode ser determinada igualando-se o peso da água no tubo com a resultante da tensão superficial que a mantém nesta posição acima do nível d'água livre (Figura 2).

O peso de água num tubo com raio  $r$  e altura de ascensão capilar  $h_c$  é:

$$(1)$$

$$P = \pi \cdot r^2 \cdot h_c \cdot \gamma_w$$

Considerando a tensão superficial  $T$  atuando em toda a superfície de contato água-tubo, a força resultante é igual a:

$$F = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot T \quad (2)$$

Igualando-se as expressões 1 e 2, tem-se:

A altura de ascensão capilar é, portanto, inversamente proporcional ao raio do tubo.

$$h_c = \frac{2 \cdot T}{r \cdot \gamma_w} \quad (3)$$

## 2.5 – Meniscos capilares

Analisando a Figura 2, conforme observado por Castro (2004) o estado de tensão da água no tubo capilar pode ser determinado. No ponto A, a pressão é igual a pressão atmosférica. Nos pontos B e C, a pressão é acrescida do peso de água (peso específico vezes a profundidade). No ponto D, a pressão é novamente igual a pressão atmosférica. Logo, no ponto E, a pressão é igual à pressão atmosférica menos a altura deste ponto em relação à superfície da água vezes o peso específico da água. O ar, no ponto F, imediatamente acima do menisco capilar, está na pressão atmosférica. A diferença de pressão entre os pontos E e F é suportada pela tensão superficial da água.

A água, como todos os corpos na superfície terrestre, ela está submetida à pressão atmosférica e esta é tomada como referência para as medidas de pressão na engenharia. Assim, trabalha-se com pressões relativas, que são as pressões absolutas menos a pressão atmosférica. Quando se diz que a água está sob pressão negativa, se esta pressão não for maior, em valor absoluto, do que a pressão atmosférica, que é da ordem de 100 kPa, as moléculas de água estão sob pressão de compressão (positiva).

## 2.6 – A água capilar nos solos

Os vazios dos solos são muito pequenos, tão pequenos que podem ser associados a tubos capilares, ainda que muito irregulares e interconectados. A situação da água capilar no solo depende do histórico do solo. O grau de saturação em função da altura sobre o nível d'água pode apresentar um dos perfis esquemáticos indicados na Figura 3.

Quando um solo seco é colocado em contato com a água, esta é sugada para o interior do solo. A altura que a água atingirá no interior do solo depende do diâmetro dos vazios.

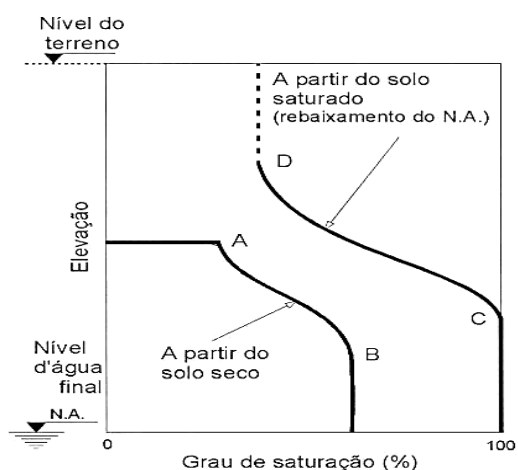


Figura 3: Perfis de ascensão capilar relacionados ao histórico do nível d'água.

Existe uma altura máxima de ascensão capilar, indicada pelo ponto A na Figura 3, que depende da ordem de grandeza dos vazios, que por sua vez, depende do tamanho das partículas. Esta altura varia com a granulometria do material, portanto, poucos centímetros para pedregulhos, um a dois metros no caso de areias, três a

quatro metros para os siltes e dezenas de metros para as argilas. Mas os vazios do solo são de dimensões muito irregulares, e durante o processo de ascensão, bolhas de ar ficam enclausuradas no interior do solo. Até uma certa altura, entretanto, indicada pelo ponto B, o grau de saturação é aproximadamente constante, ainda que não seja atingida a total saturação.

Considerando um solo que esteja originalmente abaixo do nível d'água e totalmente saturado, e tendo o nível, posteriormente, rebaixado, ocorrerá que a água dos vazios tenderá a descer. A esta tendência, se contraporá a tensão superficial, formando meniscos capilares. Se o nível baixar mais do que a altura de ascensão capilar correspondente (mais do que a tensão superficial é capaz de sustentar), a coluna de água se romperá, com parte da água, acima desta cota, ficando nos contatos entre as partículas. Fixando-se a cota d'água no nível inferior indicado, até uma certa altura, ponto C, o solo permanecerá saturado. Do ponto C ao ponto D, a água estará em canais contínuos comunicados com o lençol freático. Acima do ponto D, a água retida nos contatos entre os grãos não mais constitui um filme contínuo de água.

Portanto, existirá uma faixa de solo, correspondente a certa altura, em que a água dos vazios estará em contato com o lençol freático e sua pressão negativa será determinada pela cota em relação ao nível d'água livre, isolada do lençol.

## **2.7 – Meniscos capilares independentes do nível de água**

A água que existe nos solos que não se comunica com o lençol freático situa-se nos contatos entre os grãos, formando meniscos capilares, como mostra

esquemáticamente a Figura 4. Se existe um menisco capilar, a água se encontra numa pressão abaixo da pressão atmosférica. Da tensão superficial  $T$  atingida da água surge uma força  $P$  que aproxima as partículas.

A tensão superficial da água tende a aproximar as partículas, ou seja, aumenta tensão efetiva no solo, que é a resultante das forças que se transmitem de grão a grão.

Esta tensão efetiva confere ao solo uma coesão aparente, como a que permite a modelagem de esculturas na praia. É denominada aparente, pois não permanece se o solo secar ou saturar.

A coesão aparente é de extrema importância no que se refere a estabilidade dos solos. Muitos taludes permanecem estáveis devido a ela. Chuvas intensas podem reduzir ou eliminar a coesão aparente, razão pela qual ruptura de encostas e escavações ocorrem com muita frequência em épocas chuvosas.

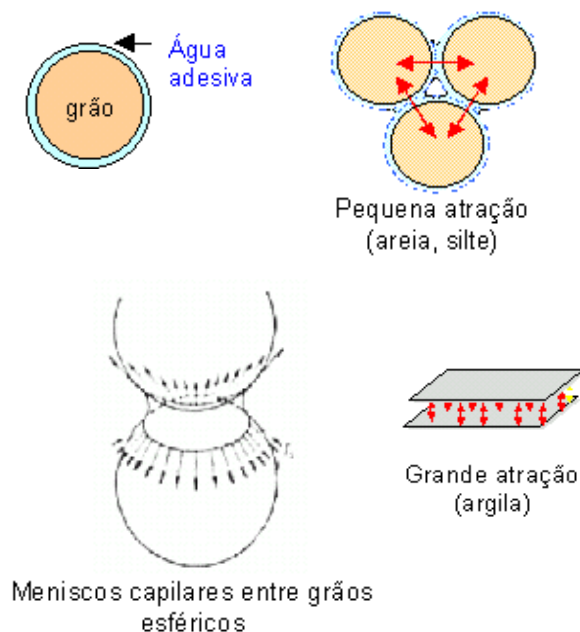


Figura 4: exemplos do fenômeno tensão capilar e coesão aparente.

## **Propriedades relevantes de solos não saturados**

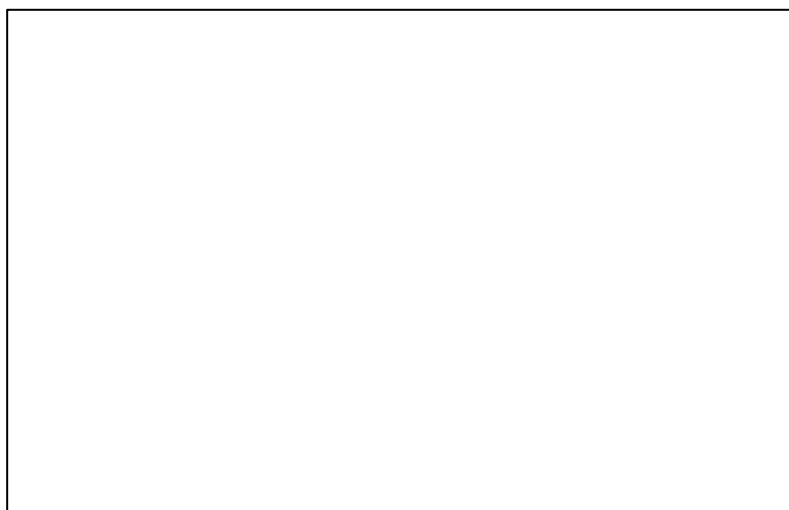
### **3.1 –Os solos não saturados e suas propriedades hidráulicas**

A determinação das propriedades hidráulicas dos solos não saturados como: curva característica (curva de retenção de água), permeabilidade saturada e não saturada também são determinadas, indiretamente, com a utilização de tensiômetros nos ensaios de laboratório e de campo.

A curva característica (figura 5 e 6) fornece a informação do grau de saturação correspondente a um determinado valor de sucção, de modo que esta curva é a medida de distribuição de vazios no solo.

Muitas propriedades de solos parcialmente saturados podem ser determinados através da curva de retenção, tais como, coeficiente de permeabilidade, resistência ao cisalhamento, deformabilidade e a quantidade de água nos vazios.

No processo de de-saturação do solo, temos três estágios onde pode ser observado na figura 5, que estão compreendidos em, saturação por efeito capilar, desaturação e saturação residual, o qual esta última o solo dificilmente perderá. Outro aspecto que deve ser observado é o ponto de entrada de ar (AEV), a partir desse ponto o solo perde sua umidade muito mais rapidamente (figura 5).



O solo apresenta uma característica retenção de água um pouco diferente para os processos de molhagem e secagem, e essa diferença é chamada de histerese. A curva de retenção também é dada pela umidade volumétrica (?) em função da carga de pressão (? ).

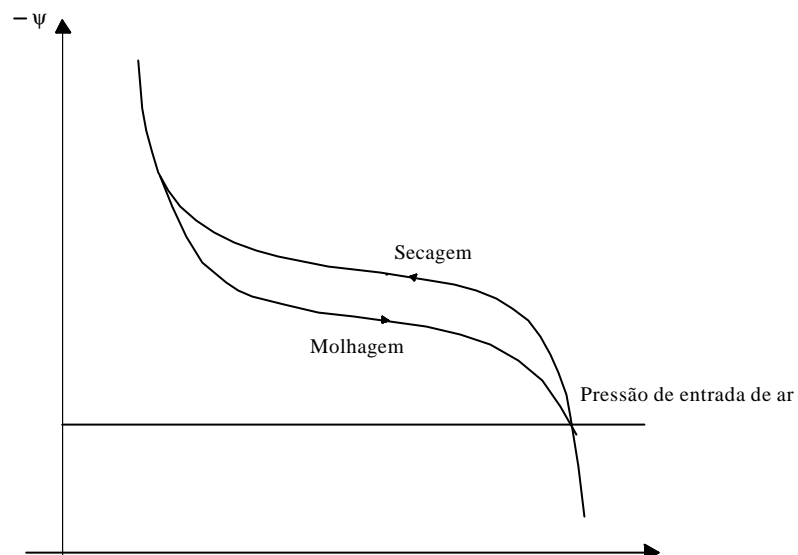


Figura 6: Curva de retenção de água no solo.

A Lei de Darcy também é válida para meios não saturados, mas a permeabilidade não é mais um valor constante.

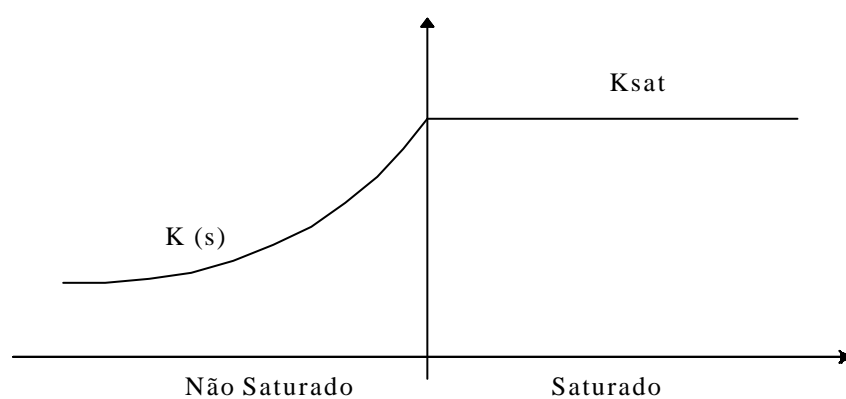


Figura 7: Curva de permeabilidade saturada e não saturada.

## Equipamentos e métodos utilizados para de terminação de propriedades hidráulicas de solos não saturados.

### 4.1 – Tensiômetro

O tensiômetro é constituído, basicamente, de um tubo fechado na parte superior, um medidor de pressão acoplado no topo e uma pedra porosa de alta pressão de entrada de ar que permite o contato solo-instrumento.

O tubo deve ser totalmente preenchido com água deaerada e destilada, para evitar que impurezas se fixem na parede do tubo e bolhas de ar se formem, diminuindo assim a cavitação do instrumento.

A pedra porosa, por sua vez, é uma das partes mais importantes do tensiômetro, pois ela é que proporciona o contato entre a água do instrumento e o solo. A pedra precisa de estar totalmente saturada e estanque no encaixe com o tubo, para que não entre ar no sistema.

O início dos ensaios pelo Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, se deu com a utilização do tensiômetro desenvolvido por Peter Fleming. Os ensaios foram realizados, primeiramente, no laboratório, para se adquirir conhecimento das características técnicas do instrumento e utilização do mesmo no solo.

Este tensiômetro apresentou grande dificuldade de operação, devido à complicada saturação do transdutor e da pedra porosa, como também, a estanqueidade do instrumento. A forma e o material do instrumento não viabilizavam que o instrumento fosse cravado dinamicamente, sendo preciso fazer um furo cônico para garantir o bom contato da pedra com o solo, o que era não era uma tarefa fácil.



Figura 8: - tensiômetros

Através de pesquisas para aprimorar este aparelho, tomou-se conhecimento de um tensiômetro de marca importada e que apresentava características ideais para o estudo proposto. Foram comprados dois destes aparelhos, da marca Irrometer (Figura 16), para prosseguir com os ensaios. Então, está sendo utilizado atualmente para a realização dos ensaios.

O instrumento possui uma bomba de vácuo manual para fazer a saturação da pedra porosa. Portanto, basta coloca-lo em um recipiente com água destilada e aplicar vácuo repetidas vezes para garantir a saturação.

Um outro tensiômetro com características um pouco diferente também está sendo utilizado nos ensaios de laboratório, que é o Watermark. Este instrumento tem um formato cilíndrico, com altura de aproximadamente 10cm, feito de um material especial capaz de absorver grande quantidade de água e protegido por uma tela metálica para não ser danificado ao introduzi-lo no solo. Ele mede a variação da resistência elétrica do solo e a variação da temperatura em função da umidade deste. O custo deste aparelho tem uma grande vantagem em relação aos outros utilizados até momento, mas ainda não se tem um total domínio do uso.

Com o conhecimento adquirido nos ensaios, foi possível projetar um tensiômetro que atendesse as necessidades encontradas no campo e que tivesse um baixo custo. Então, desenvolveu-se um instrumento de metal, que fosse capaz de penetrar no solo por um mecanismo estático ou dinâmico (Figura 9).

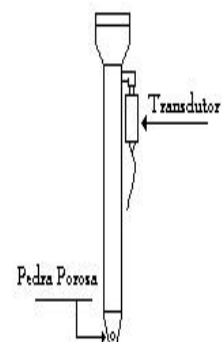


Figura 9: Tensiômetro desenvolvido na PUC-Rio

## 4.2 – Sistema de aquisição de dados

Foi desenvolvido um sistema eletrônico para aquisição de dados, para ser conectado a um computador. O sistema eletrônico lê a corrente no instrumento para gerar números no programa Windaq Aquisicion.

O programa possui quatro canais de leitura, podendo ler diversos tipos de instrumentos. É possível fazer a aquisição dos dados em frequências de até 50 leituras por segundo em cada canal, fornecendo dados bastante confiáveis.

Os dados são gerados em planilhas do formato Excel, facilitando a análise dos dados e a confecção de gráficos. O laptop e o sistema são alimentados por uma bateria de 12 volts, para possibilitar diversos ensaios no campo.

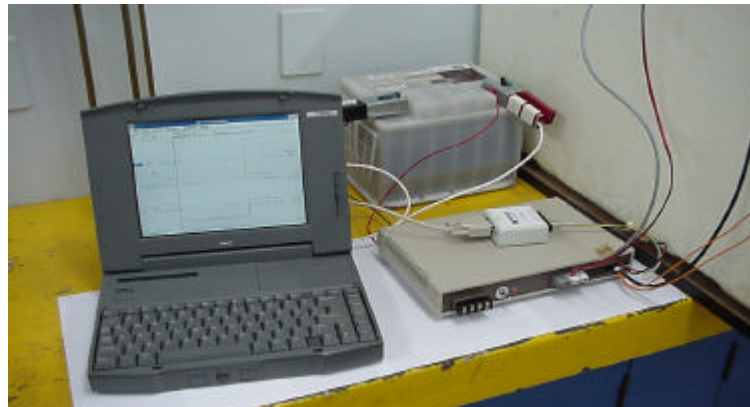


Figura 10: Sistema de aquisição de dados com o computador (Castro, 2004).

### 4.3 - Permeômetro de Guelph

Permeômetro de Guelph é um equipamento utilizado para aplicação de carga constante de pressão, o qual funciona pelo princípio da garrafa de Mariotte. O aparelho permite determinar, de maneira simples e rápida, a permeabilidade saturada, não saturada e, ainda, o fluxo matricial, bem como a sorvidade do solo.

O permeômetro é constituído, resumidamente, por um reservatório externo (maior), para condutividades maiores e um interno (menor), para menores condutividades. Um tripé para suporte também faz parte do aparelho. Na parte superior do permeômetro encontra-se a entrada de ar. Essa é graduada a fim de permitir a medida de carga de água utilizada no ensaio (figura 11, 12).

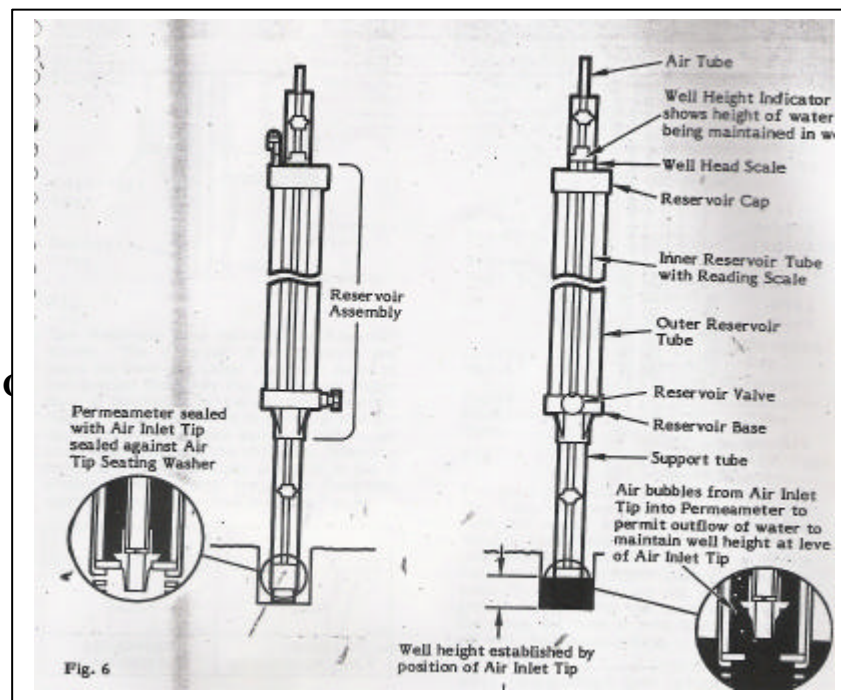


Figura 11: Esquema das partes componentes do permeômetro de Ghelph, modelo (2800 KI)

#### **4.4 - Método do Papel Filtro**

O método do papel filtro tem como base o princípio de que um solo, parcialmente, saturado, quando posto em contato com um papel filtro, com umidade menor, faz com que este último absorva uma certa quantidade de água do solo até que o sistema entra em equilíbrio de pressão.

No caso do método, o fluxo de água pode ocorrer de duas formas: por fluxo de vapor ou por fluxo capilar. Se o fluxo ocorrer, apenas, através de vapor, o papel filtro medirá a sucção total, uma vez que, estará incorporando forças osmóticas e capilares, que retêm a molécula de água. Quando o fluxo ocorre, apenas, por capilaridade, a sucção matricial é medida.

É necessário utilizar papéis filtros ditos como quantitativos, sendo os mais usados Whatman N° 42 ou Schleicher & Schuell N° 589.

## Técnicas de ensaios em campo e laboratório

### 5.1 – Ensaios realizados

Os ensaios foram realizados usando-se o tensiômetro da marca Irrometer e o permeâmetro de Guelph (modelo 2800KI). As áreas selecionadas para estes ensaios foram o campo experimental da PUC-Rio, localizado atrás do prédio do Lab Grad, e um talude no município de Duque de Caxias, próximo à Casa do Alemão (restaurante tradicional da região).

Estes ensaios seguiram a técnica proposta pelo projeto CNPQ - Determinação de Propriedades Hidráulicas de Solos Não Saturados<sup>8</sup>, desenvolvido no período de março de 2005 até junho de 2006. Os presentes ensaios foram realizados usando o permeâmetro de Guelph que possibilita efetuar a molhagem do solo com carga de coluna d'água constante, para medir como a sucção do solo varia ao longo do tempo. Enquanto isto, são adquiridos dados necessários para a determinação da curva de sucção/tempo através do programa Windaq Aquisicion .

Foi utilizado o permeâmetro de Guelph (figura 12(a) e 12(b)), para determinar a permeabilidade saturada, o potencial mátrico no talude de Duque de Caxias, e através desses parâmetros foi possível determinar a permeabilidade não saturada.

Os ensaios feitos em laboratório visavam a determinar como a umidade do solo variava com a sucção, a fim de comparar os resultados obtidos *in situ* com os métodos *ex situ*, através da determinação da curva característica do método do Papel Filtro<sup>9</sup>.

---

<sup>8</sup> Castro, B.G., 2004

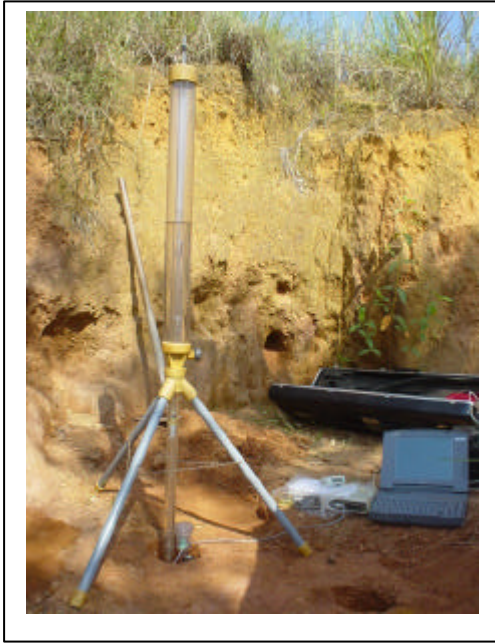


Figura 12(a): Arranjo geral do ensaio na encosta de Duque de Caxias

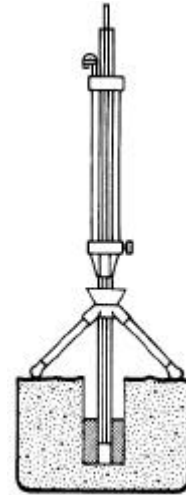


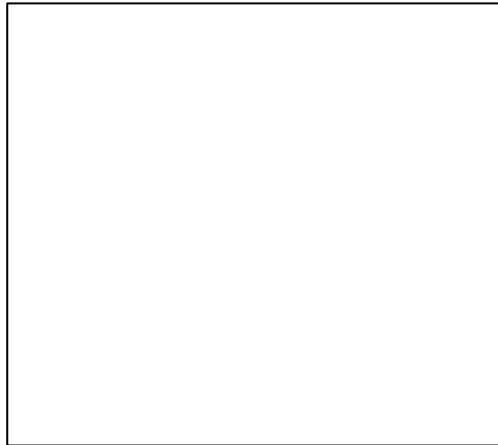
Figura 12(b): Ensaio no campo.

## 5.2 - Materiais e Métodos

Nos ensaios realizados em campo adotaram-se os seguintes procedimentos: inicialmente o material mais superficial do solo foi limpo com uso de uma enxada de modo a possibilitar o experimento. Posteriormente, fez uma pequena trincheira (14cm L x 14cm P ) com uma cavadeira, neste mesmo local, com o uso de um trado de diâmetro (21mm ) junto com uma haste para rotacionar o mesmo. Nesta trincheira fez-se um furo, um pouco menor do que o da pedra porosa para evitar a percolação preferencial, de aproximadamente 12cm de profundidade para introduzir o tensiômetro (figura 13).

---

<sup>9</sup> Marinho, 1997.



Depois da instalação do tensiômetro, deixou-se que a leitura do mesmo fosse estabilizada e, em seguida, aplicou-se uma carga constante de 5cm altura de água na trincheira. Desta forma fez-se a leitura de pressão que variou ao longo do tempo, até atingir o valor da pressão da coluna d'água do tubo, denominado processo de molhagem.

Em outro ensaio realizado, usando-se o permeâmetro de Guelph, fez-se um furo manualmente com um trado de 2" de diâmetro e com uma profundidade de 15cm. Em seguida colocou-se o permeâmetro, como descrito na figura 14, e aplicou-se uma carga de 5cm para se fazer a leitura do reservatório graduado em centímetros, com intervalos de 1min, até se obter a mesma leitura (R1) consecutivamente. Posteriormente, procedeu-se da mesma forma, contudo aplicando-se uma carga de 10cm, até a obtenção de três leituras iguais (R2). Com estes valores foi possível calcular-se a permeabilidade saturada (equação 4, dado em cm/s), o potencial mátrico (equação 5, dado em  $\text{cm}^2/\text{s}$ ), o alfa (equação 6, dado em  $\text{cm}^{-1}$ ), através das equações:

**Permeabilidade Saturada:**

$$K_{fs} = 0,0041 \times (35,39) \times (R_2 \div 60) - 0,0054 \times (35,39) \times (R_1 \div 60) \quad (4)$$

**Potencial Mátrico:**

$$f_m = 0,0572 \times (35,39) \times (R_1 \div 60) - 0,0237 \times (35,39) \times (R_2 \div 60) \quad (5)$$

**Parâmetro Alfa:**

$$a = K_{fs} \div f_m \quad (6)$$

**Permeabilidade não saturada:**

$$K_{nfs} = K_{fs} \times e^{-aj} \quad (7)$$



Figura 14: Ensaio com permeômetro de Guelph, para determinação de parâmetros hidráulicos no talude em Duque de Caxias.

Os ensaios foram realizados usando-se os tensiômetro na vertical porque havia a possibilidade da água percolar em volta do tubo do tensiômetro e influenciar na medição. Deste modo fez-se um corte na encosta e colocou-se um outro tensiômetro na horizontal e procedeu-se colocando um pouco de solo em volta do instrumento, compactando o solo levemente de modo a eliminar esta possibilidade. De fato, verificou-se que os resultados não eram influenciados por este fator, conforme figura 15 e 16.

A fim de comprovar mais uma vez a não percolação da água em torno do tensiômetro, procedeu-se como sugerido por no experimento conduzido por Castro (2004).

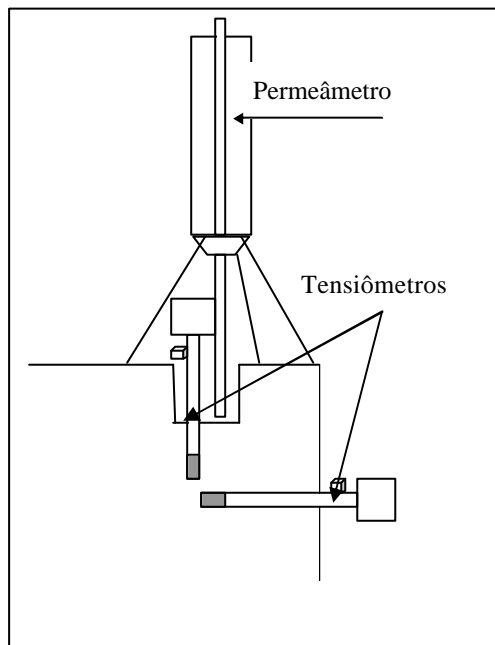


Figura 15: Arranjo geral do ensaio na encosta do Campo Experimental (Castro, 2004 )



Figura 16: Ensaio geral feito no talude em Duquede Caxias

A outra técnica, a do uso do papel filtro (Marinho) foi adotada usando-se dez anéis de alumínio, com as dimensões de aproximadamente de 5 cm x 2 cm, onde foram coletados 10 corpos de provas de solo indeformado no campo experimental da PUC-Rio. Assim, determinou-se a umidade volumétrica de cada corpo de prova, sendo possível estabelecer a necessidade de umedecimento ou secagem das amostras.

Esperou-se três dias para a colocação dos papéis filtro, e deixou-se que os mesmo fossem equalizados por um período de dez dias. Em seguida retirou-se tais papéis, e observou-se a perda de água ao longo do tempo (intervalo de 10 segundos até 1:20 segundos) em cada respectivo papel, pesando-se em uma balança de precisão de décimo de milésimo. Em seguida, estes mesmos papéis foram colocados na estufa, por um período de vinte e quatro horas, e foram pesados novamente, como no processo anterior, entretanto observando-se o seu umedecimento.

A partir destes dados foi possível determinar a curva característica do solo em questão.

### **5.3 - Resultados**

Os valores encontrados de sucção em função do tempo, nos ensaios feitos no talude de Duque de Caxias e na encosta do campo experimental da PUC-Rio, serão futuramente retro-analisados por um método numérico, a fim de obter-se a curva de retenção de água e compará-la com algum outro tipo de procedimento para determinação da mesma (Papel Filtro, Placa de Pressão, Panela de Richard, etc).

Nos procedimentos adotados para a molhagem do solo, foi possível observar como a sucção variava com os avanços da frente de infiltração (figura 17 e 18).

Entretanto, notou-se que o formato da curva de sucção e o tempo em que a poro-pressão tende a zero (figura 17, 18), depende das condições do solo.

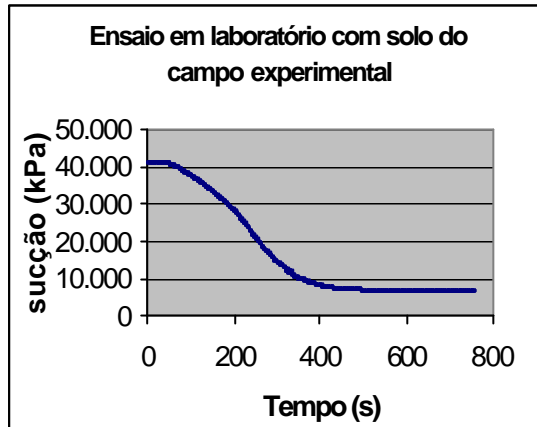


Figura 17: Ensaio com solo do Campo Experimental. (Castro, 2004)

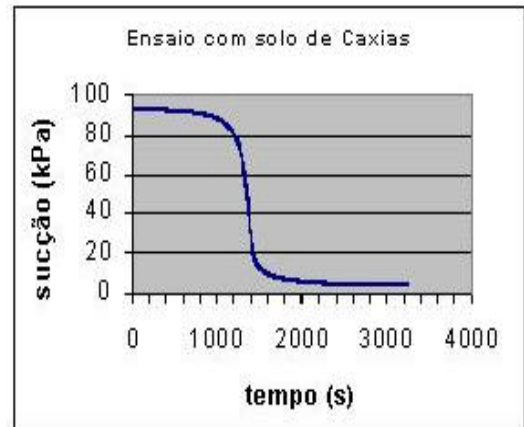


Figura 18: Ensaio com solo de Duque de Caxias. (Castro, 2004)

Foram realizados três ensaios aproximadamente no mesmo local, na parte mais alta da encosta do campo experimental da PUC. Foi observado que o formato da curva de três ensaios (figura 19, 20, 21), bem como o intervalo da chegada do bulbo de saturação, ficaram muito próximos. Entretanto, no quarto ensaio realizado, a curva do gráfico mostrou-se bem diferente (figura 22) e a saturação do solo apresentou um intervalo de tempo muito maior. Isso provavelmente foi devido às características (textura, grau de compactação, etc) do solo não serem as mesmas, já que esta área é muito usada para ensaios de campo e para a retirada de amostras de solo.

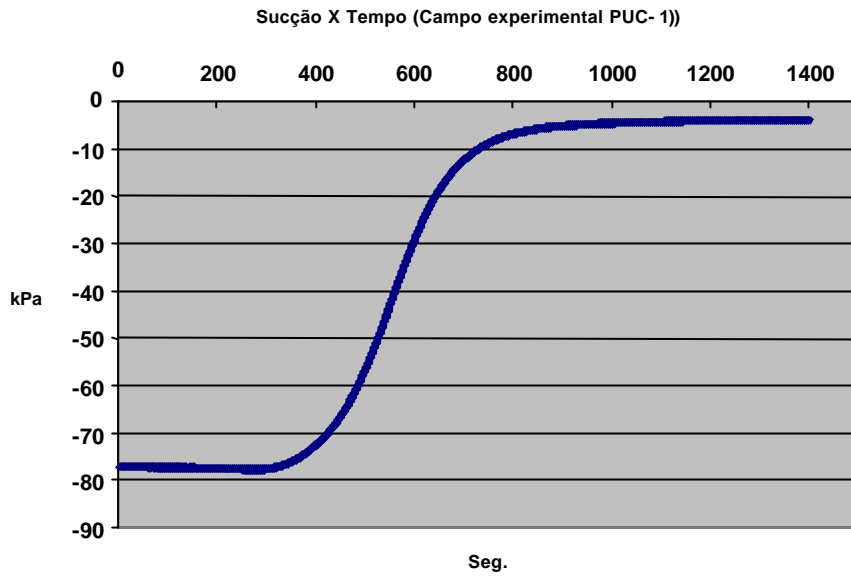


Figura 19 (alto da encosta)

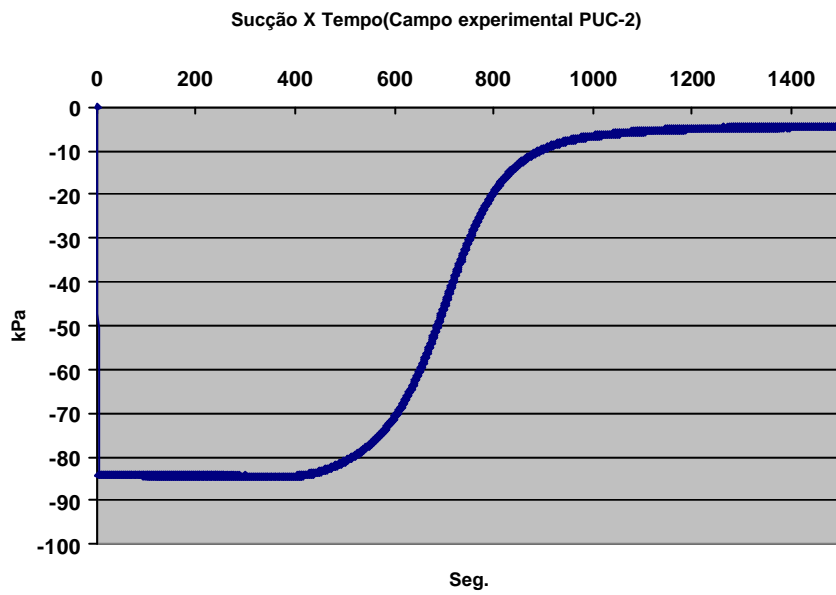


Figura 20 (alto da encosta)

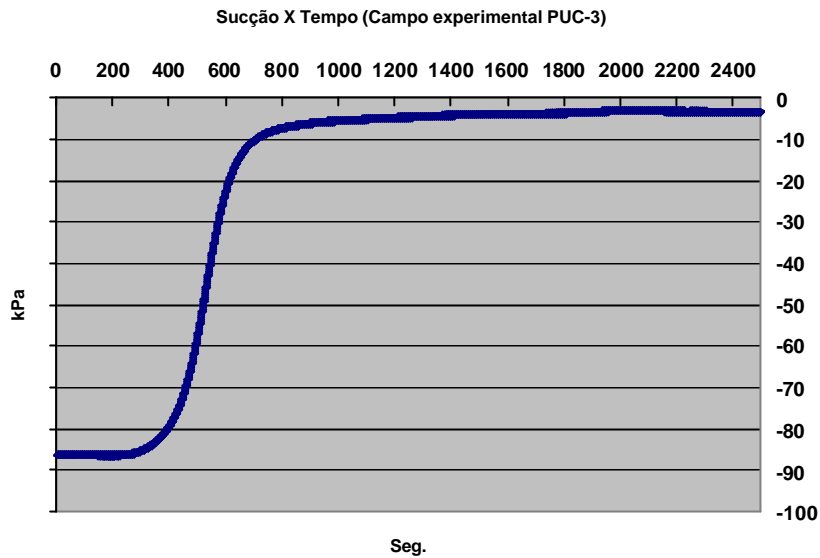


Figura 21 (alto da encosta)

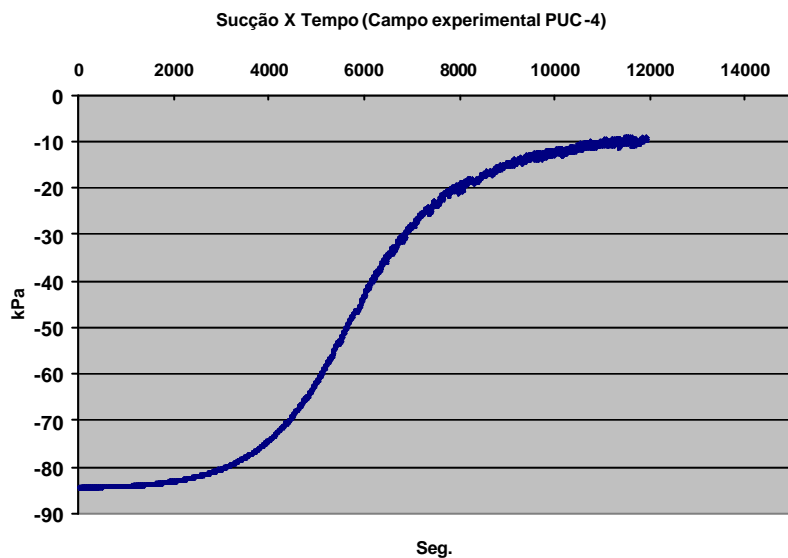


Figura 22 (alto da encosta)

Comparando-se os resultados dos ensaios realizados anteriormente por Castro (2004) no campo experimental (figura 23, tensiômetro grande, figura 24 tensiômetro horizontal), com os ensaios posteriormente realizados (figura. 19, 20 e 21), foi possível perceber semelhança no formato das curvas. Porém o tempo de chegada do bulbo de saturação foi muito maior para nos gráficos apresentados nas figuras 19, 20 e 21. Isto provavelmente deve-se ao fato dos ensaios terem sido feitos em locais e cotas distintas.

Os ensaios apresentados nas figuras 23 e 24, foram realizados ao pé da encosta, que se caracteriza por ser uma zona menos modificada, e possuir uma menor incidência de pessoas no local. Portanto, contribuindo para uma menor compactação do solo, e favorecendo um avanço mais rápido da frente de infiltração.

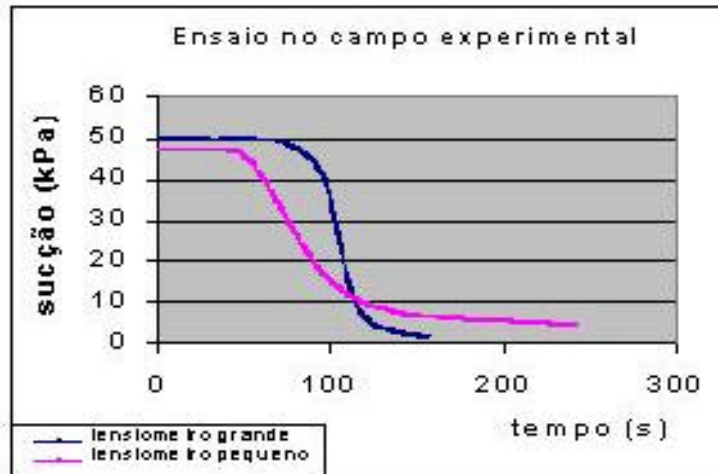


Figura 23: Ensaio na base da encosta (Castro, 2004)

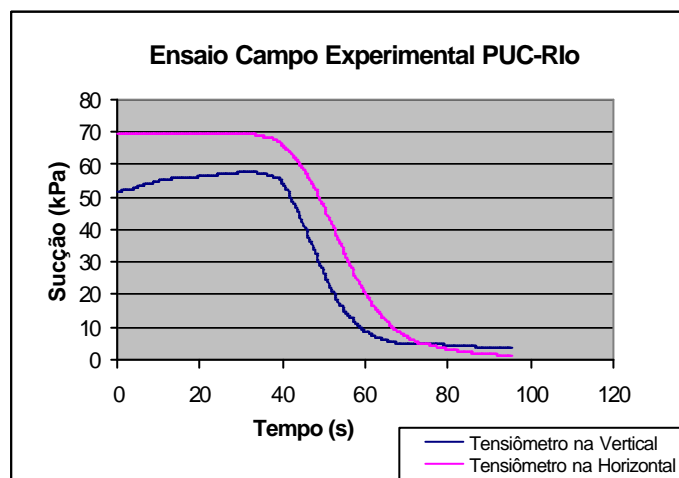


Figura 24: Ensaio com tensiômetro na vertical e outro na horizontal (Castro, 2004)

Os ensaios realizados no Talude de Duque de Caxias para comprovar, mais uma vez, o que já havia sido feito anteriormente (figura 24), ou seja uma leve compactação com um pouco de solo em torno do tensiômetro para diminuir a água no reservatório (trincheira) que irá percolar preferencialmente em volta do aparelho.

Notou-se que as curvas dos ensaios vertical 2 e 3 (figura 25) se assemelhavam. Isto provavelmente comprova que a técnica diminui a infiltração em torno do equipamento, embora o ensaio na vertical 1 tenha apresentado uma curva bem diferente das outras. Isto provavelmente se deve ao fato das condições do solo não estarem semelhantes aos outros ensaios.

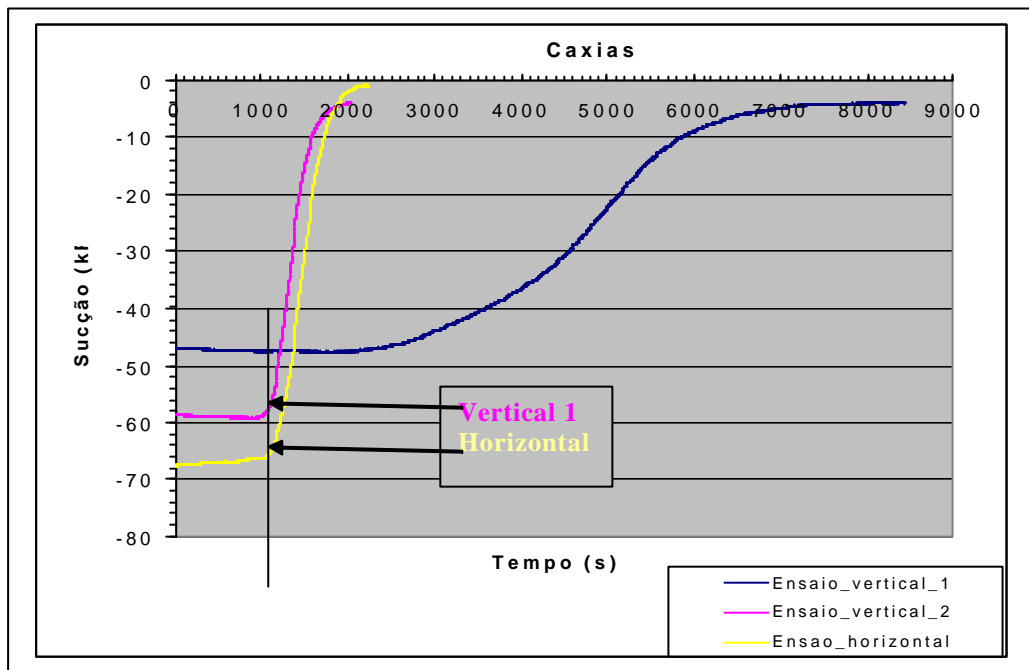


Figura 25: Ensaio com Tensiômetro na vertical e outro na horizontal no talude em Duque de Caxias

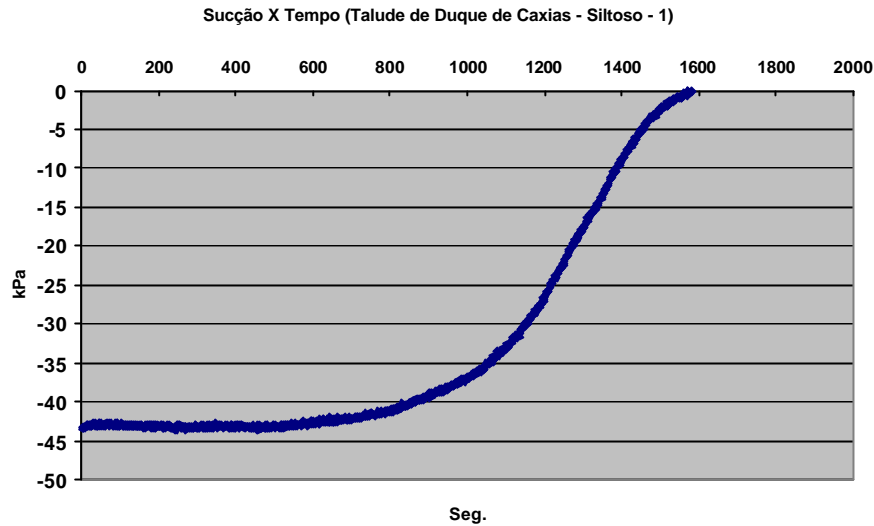


Figura 26

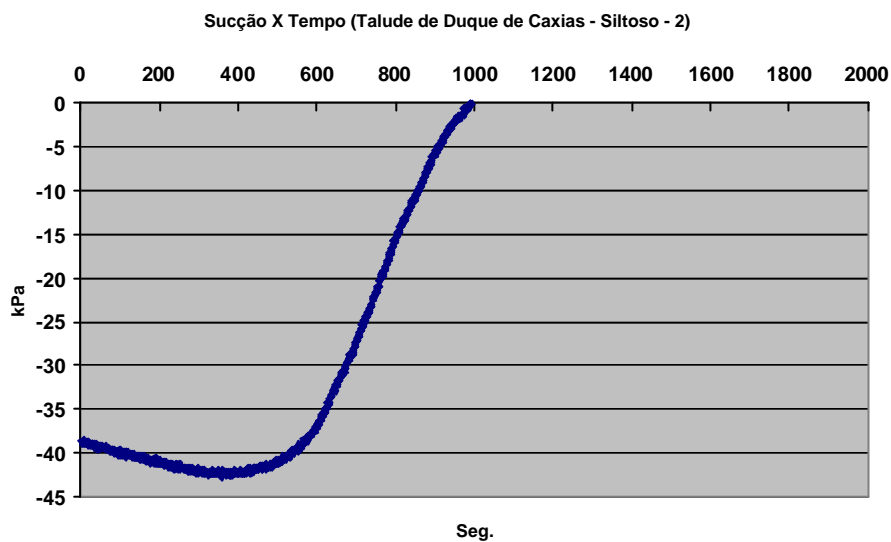


Figura 27

Com os ensaios efetuados no talude de Duque de Caxias não foi possível efetuar-se uma comparação com os resultados obtido por Castro (2004), uma vez que os mesmos apresentaram o formato da curva e intervalo muito diverso.

Foi realizado um ensaio com de permeabilidade com permeâmetro de Ghelph, sendo obtidos os valores apresentados na tabela seguinte (tabela 1):

Tabela 1

$K_{fs} =$	<b>3,13E-03</b>	<b>cm/s</b>
$Fm =$	<b>6,45E-03</b>	<b>cm<sup>2</sup>/s</b>
$a =$	<b>4,84E-01</b>	<b>cm<sup>-1</sup></b>

Os ensaios efetuados pelo método do Papel Filtro para determinação da curva característica, para posteriormente comparação com as curvas determinadas pela retro-análise dos dados de sucção versus tempo, não alcançaram os objetivos desejados. Os pontos encontrados pelo método, no gráfico de sucção versus umidade volumétrica (figura 28(a), 28(b) e 29), situam-se em sua maioria em um valor bem acima de 100 kPa, enquanto que o tensiômetro (Irrometer) trabalha em um valor máximo inferior ao referido valor.

A curva característica obtida pelo método do papel filtro ficou comprometida para uma eventual comparação de observar características, argilosas, siltosas, etc. Tendo em vista que os intervalos de pontos da curva ficaram restritos a um intervalo pequeno propositalmente, a fim de se obter um maior número de pontos possíveis na faixa que vai de 0 a 100 kPa, mas que também não ocorreu, devido a dificuldade de trabalhar com este método em um valor de sucção muito baixo.

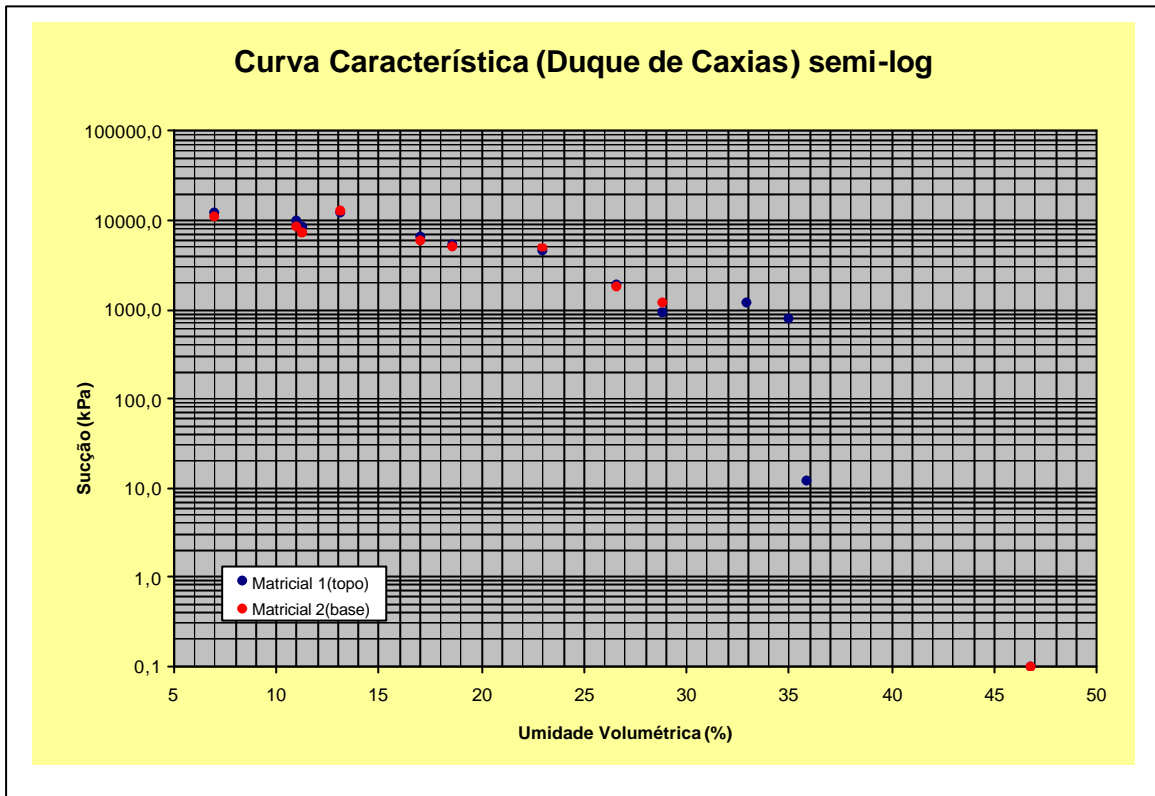


Figura 28(a): amostra indeformada de solo de Duque de Caxias

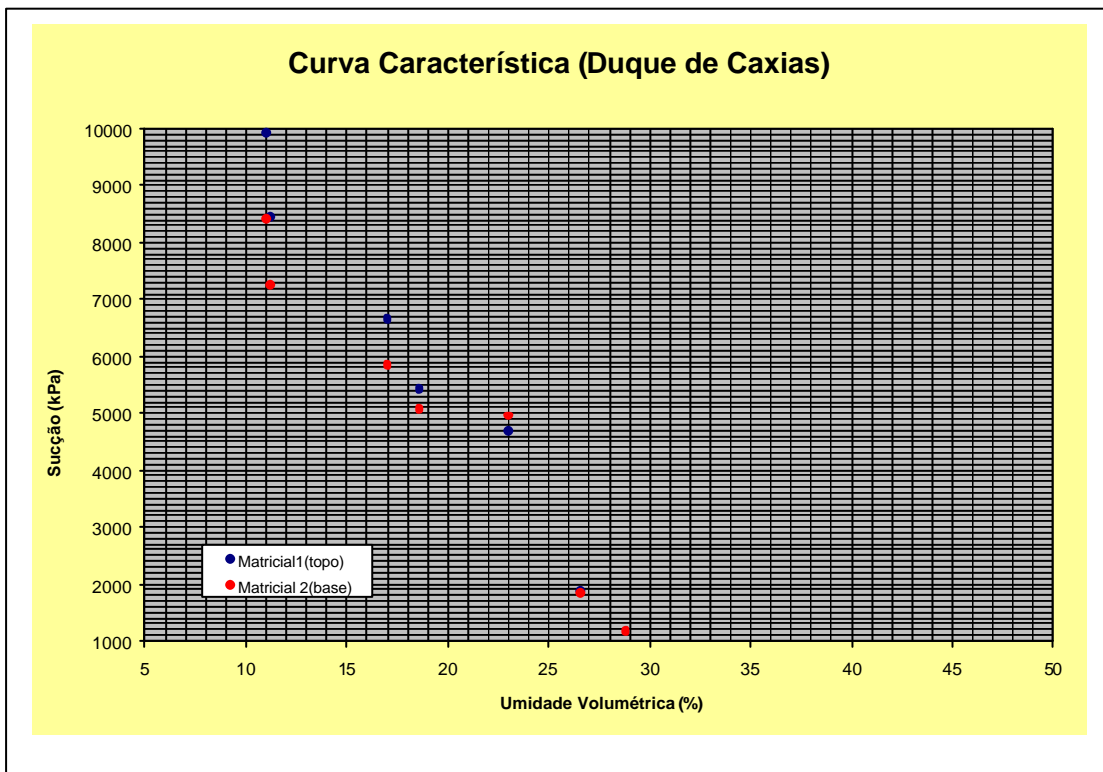
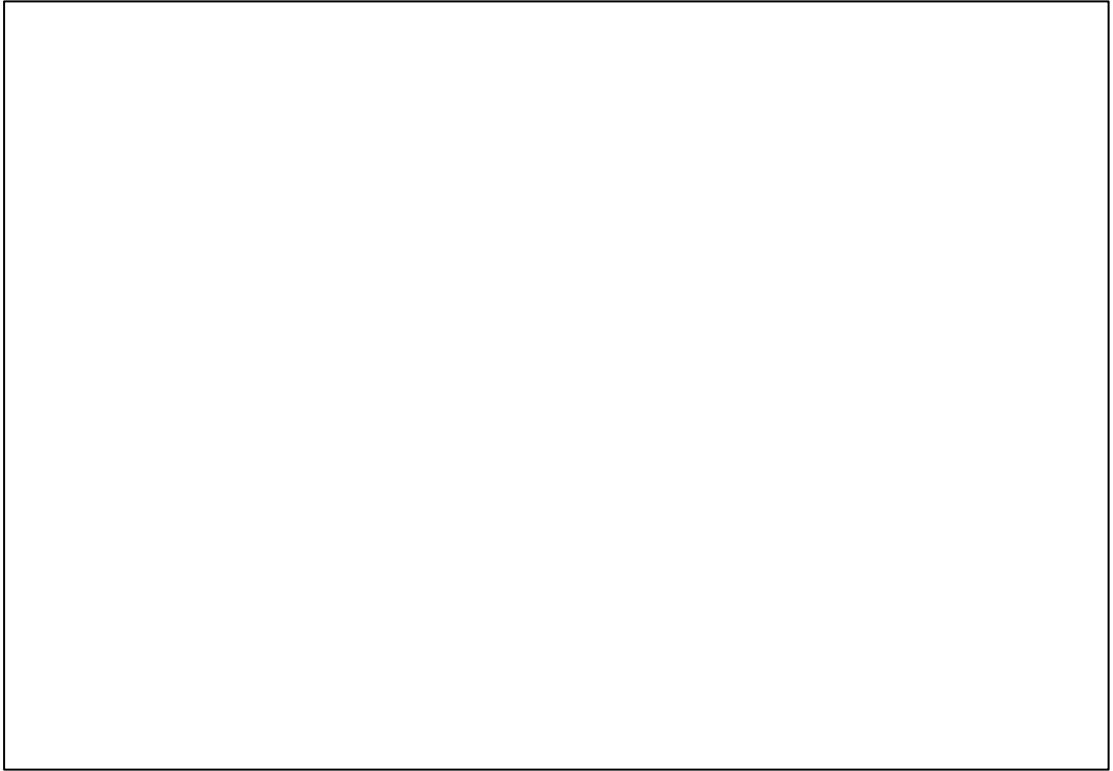


Figura 28(b): amostra indeformada de solo de Duque de Caxias



## Conclusão

Foi possível observar as vantagens e desvantagens dos ensaios realizados. A facilidade da técnica utilizada em campo com tensiômetro e o permeâmetro de Ghelph foram visíveis no que concerne a praticidade. Tal técnica, ainda que utilize a retro-análise matemática, apresenta um tempo bem menor de determinação da curva característica do que o método do papel filtro. Entretanto, o ponto negativo da técnica de campo é o fato do procedimento só funcionar bem em solos que estejam com um grau de saturação baixo, pois o equipamento só funciona em uma faixa de 0 a 100 kPa. Isto mostra que a determinação da curva característica pelo método do papel filtro, provavelmente, não serve de comparação para os dados obtidos em campo, pois os pontos obtidos no gráfico (figuras 28 e 29) encontram-se em sua maioria fora da faixa de trabalho do tensiômetro.

Ainda não foi possível observar um padrão de curvas de retenção de água das respectivas áreas estudadas – a saber, talude de Duque de Caxias, parte siltosa e arenosa e o campo experimental da PUC-Rio. Primeiramente, cabe destacar que houve dificuldades devido à distância do local estudado e a indisponibilidade do aparelho utilizado – permeâmetro de Ghelph. Além disso, o tempo de preparo do terreno – que exige tanto a limpeza do material mais superficial<sup>10</sup>, quanto a instalação do equipamento – fez com que o número de ensaios de campo fosse reduzido.

---

<sup>10</sup> Como por exemplo, cobertura vegetal, material aterrado, etc.

## **Recomendações a futuros ensaios**

Já foram realizados inúmeros ensaios em campo, com resultados importantes, mas ainda há muito que se fazer. Atualmente, está em andamento a determinação da curva característica em um intervalo de sucção que trabalha o tensiômetro, a fim de comparar dados de campo com os dados de laboratório.

O objetivo agora é realizar mais ensaios de campo, e realizar o procedimento em laboratório com o processo de secagem para verificar se o comportamento do solo é semelhante ao processo de molhagem.

## Bibliografia

- CASTRO, G. B.. “Desenvolvimento de tensiômetros automáticos para estudos de propriedades hidráulicas de solos não saturados.” Monografia de Graduação. Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica – Puc/RJ, 2004.
- FLEMING, P. M . “Desenvolvimento de um sistema tensiométrico automático para medida de poro pressões e encostas não saturadas.” Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica – Puc/RJ, 1994.
- FREDLUND D.G – “From Theory to the Practice of Unsaturated Soil Mechanics”. In Campos de, T.M.P & Vargas Jr. E.A. (eds.) *Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Ñ Sat’ 97*. V.II. Pontifícia Universidade Católica – PUC/RJ, abril, 1997.
- GARDNER, W. “The Movement of Moisture in Soil by Capillarity.” Soil Science, V. 7., 1919. *Apud* FLEMING, P. M. “Desenvolvimento de um sistema tensiométrico automático para medida de poro pressões e encostas não saturadas.” Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica – Puc/RJ, 1994.
- MARINHO, F.A.M. “Medição de Sucção em Solos”. In Campos de, T.M.P & Vargas Jr. E.A. (eds.) *Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Ñ Sat’ 97*. V.II. Pontifícia Universidade Católica – PUC/RJ, abril, 1997.
- PINTO, C. S. *Curso de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*. 2ªed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2002.
- RICHARD, L.A. “Methods of Measuring Soil Moisture Tension.” Soil Science, V. 68., 1949. *Apud* FLEMING, P. M. “Desenvolvimento de um sistema tensiométrico automático para medida de poro pressões e encostas não saturadas.” Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica – Puc/RJ, 1994.
- \_\_\_\_\_. “Soil Moisture Content Calculations from Capillary Tension Records.” Soil Science, 1938. *Apud* FLEMING, P. M. “Desenvolvimento de um sistema tensiométrico automático para medida de poro pressões e encostas não saturadas.” Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica – Puc/RJ, 1994.
- ZHOU, J. & YU J. “Influences affecting the soil-water characteristic curve”. Institute of Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Zhejiang University. Disponível em <http://www.zju.edu.cn/jzus>.

