

4

Ensaio de Infiltração Monitorada [EIM] Equipamentos e Metodologia de ensaio

O objetivo da dissertação como citado no capítulo 1, se refere à obtenção dos parâmetros do modelo de Van Genuchten de solos não saturados, residuais em maioria, das encostas do Rio de Janeiro.

A escolha dos locais a serem ensaiados foi feita de forma a tratar da conveniência principalmente nos quesitos, diversidade litológica¹⁹, acesso, segurança e praticidade.

As propriedades hidráulicas dos solos foram obtidas em campo através do ensaio inverso chamado ensaio de infiltração monitorada (EIM) (que será descrito a seguir na seção 4.1), e restringiu-se no presente trabalho o seu uso a solos com $K_{sat} < 10^{-7}$ cm/s²⁰. A ferramenta usada para a retroanálise dos parâmetros foi o programa Hydrus 2D/3D.

Foram feitas também as caracterizações físicas básicas dos materiais: análise granulométrica, limites de consistência, peso específico dos grãos (G_s) e massa específica seca (ρ_d) (seção 6.1). Alguns outros ensaios de Guelph, permeabilidade saturada (triaxial) e papel filtro foram comparados com os resultados obtidos no ensaio de infiltração monitorada (EIM).

4.1. Ensaio de Infiltração Monitorada (EIM)

4.1.1. Teoria do Ensaio

O ensaio consiste na obtenção de valores de sucção (variável dependente) ao longo do tempo a uma profundidade conhecida (curva $\Psi(t)$, Figura 13), determinada pela profundidade da cápsula porosa do tensiômetro (Figura 14).

¹⁹ Feita a partir de Mapas Geológico/Geotécnicos e com revisão de trabalhos anteriores

²⁰ Indicado por Steward e Nalam (1987) para o uso de permeômetros de carga constante (Apud Lobato, 2006).

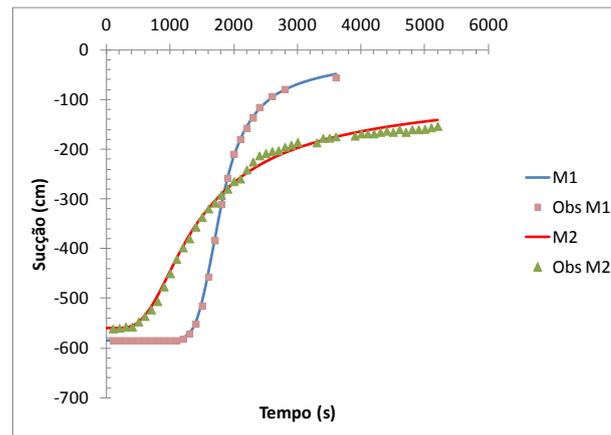


Figura 13 – Nós de observação na cápsula porosa

Para o tal são estabelecidas condições de axissimetria (Figura 14) em um furo de profundidade conhecida, limitado a uma dada carga de pressão positiva constante que deve ser aplicada como parte do contorno do problema (Dirichlet) como pode ser visto na Figura 14.

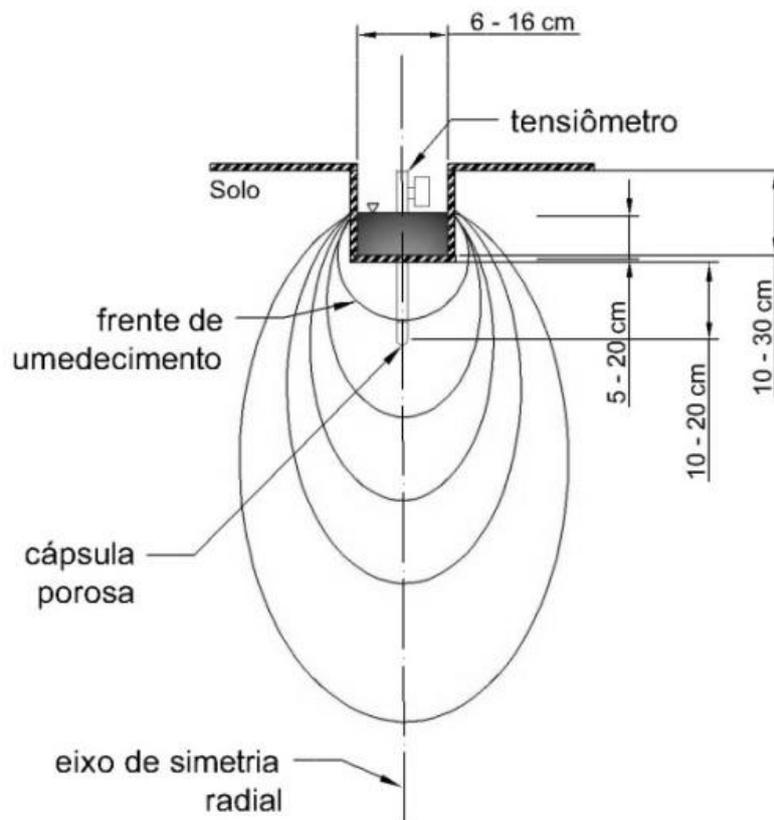


Figura 14 – Esquema do ensaio de infiltração monitorada

Com a curva $\Psi(t)$ e resolvendo o problema inverso, através do programa Hydrus 2D/3D (Figura 15), procura-se obter o vetor de parâmetros do modelo de van Genuchten-Maulem (seção 2.1.2). Neste modelo há representação tanto para a curva característica (Eq. 2.13) como para a curva de condutividade hidráulica (Eq. 2.15).

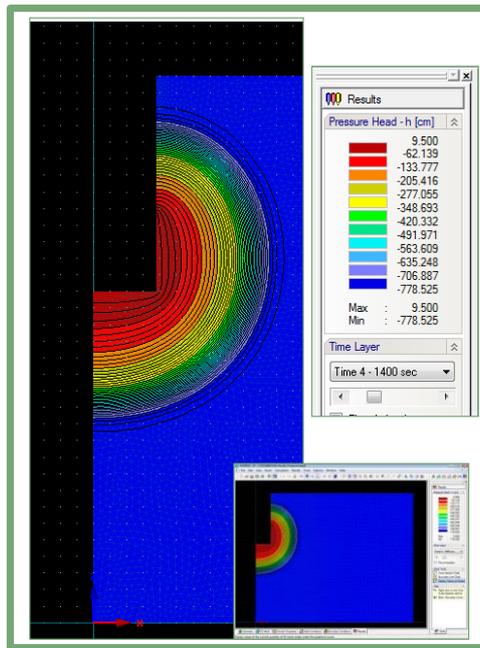


Figura 15 – Interface do programa Hydrus 2D/3D

Antes de apresentar os equipamentos e a montagem do ensaio é conveniente apresentar as conclusões do trabalho de Velloso (2000) que demonstram as vantagens e as limitações do método e servirão de normas ou balizamento.

4.1.2. Normas e validação

Não existem normas para o ensaio, porém o estudo numérico conduzido por Velloso (2000) sugere para a geometria da Figura 16 que:

- Através das análises de sensibilidade e identificabilidade concluiu-se que somente três dos parâmetros²¹ do modelo vanGenuchten-

²¹ Os outros dois parâmetros, l e m , foram fixados de forma conceitual como visto na seção 2.1.2.

Maulem, α , n e k_{sat} , podem ser estimados independentemente, sendo θ_r e θ_s obtidos com outra metodologia²².

- O ensaio parece reproduzir satisfatoriamente as curvas característica e de condutividade para as condições de umidade acima da inicial, não devendo ser extrapolada para condições abaixo desta.

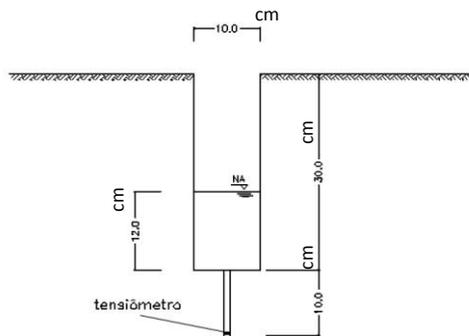


Figura 16 - Configuração ensaio proposto no trabalho de Velloso (Velloso, 2000)

Assim como Velloso (2000), Simunek (1996) também comprovou que a retroanálise dos parâmetros com medidas de sucção seriam suficientes para a definição de um mínimo, porém informações adicionais de umidade tornariam a solução mais definida²³. Em relação ao parâmetro θ_r (umidade volumétrica residual) estudos em Inoue *et al.* (1998), Zurmühl e Durner (1998), Simunek *et al.* (1998b), Kelleners *et al.* (2005), Mertens *et al.* (2006) o definiram como sendo o menos sensível dos 6 parâmetros de Van Genuchten-Maulem (θ_r , θ_s , α , n , l , e k_{sat}) (Apud Wöhling *et al.*, 2008). Muitos desses autores o fixaram com valor zero, no entanto o presente estudo utilizou-o (θ_r) fixo, com valores próximos a 10% de θ_s (umidade volumétrica saturada) ou estimados a partir do programa Rosetta de pedotransferência, que tem como entrada os valores texturais e de massa específica seca (seção 6.5.1).

²² θ_s estimado a partir da porosidade e θ_r através do programa Rosetta ou 10% de θ_s .

²³ Como por exemplo, a vazão acumulada do ensaio do permeâmetro de Guelph utilizada por Campos (1993). (obs: no caso a solução foi aproximada para regime permanente com a equação de Laplace). No entanto em Simunek (1996) com um ensaio de infiltrômetro de tensão adaptado esse tipo de informação não representou uma melhora na topologia da função objetivo, o que indica o mesmo resultado para o EIM.

4.2. Equipamentos e Metodologia

4.2.1. Equipamentos

Os equipamentos usados para o ensaio de campo são:

- **Garrafa de Mariotte** do permeâmetro de Guelph, para aplicar um valor de carga constante (Figura 12 e Figura 17);

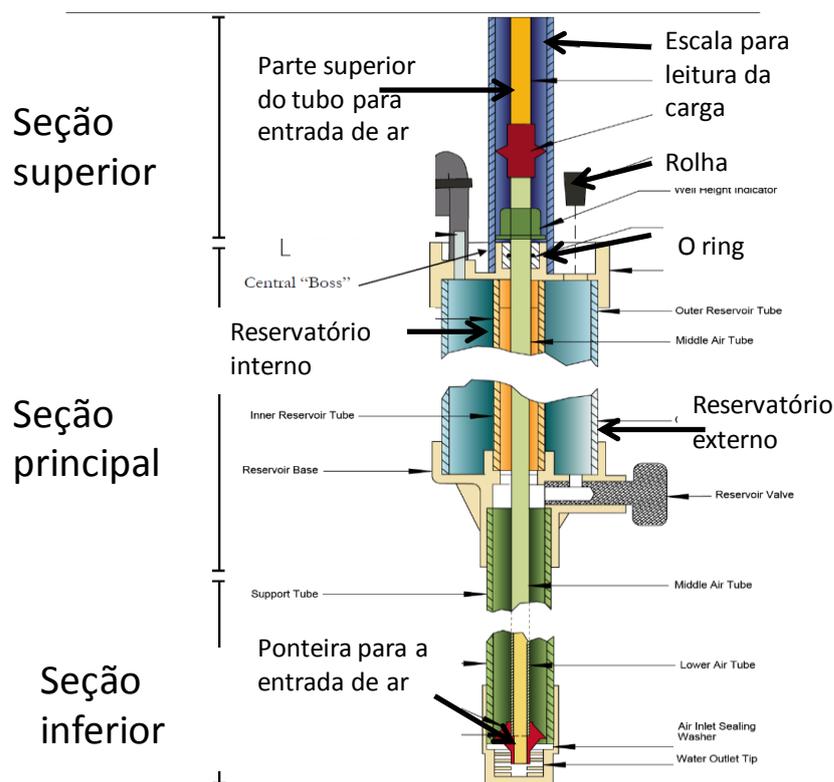


Figura 17 – (a) Descrição do Guelph - Brochura SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP. 0898-2800K1 (May 2012)

- **Tensiômetro**, a fim de realizar as leituras de carga com o tempo;
 - (Irrometer, Modelo RS 93 (Figura 18)) com ponteira removível, Pequeno com extensão 46,5 cm e médio 60,5 cm e 2 cm de diâmetro;
 - (UMS, Modelo I-802-T5x (Figura 19)), mini-tensiômetros com 7,5 cm de extensão e 5 mm de diâmetro ;



Figura 18 - Tensiômetro Irrometer



Figura 19 - Tensiômetro T5

- **Data logger**, para converter o sinal analógico para digital e um **laptop** para acomodar o software e gravar os dados coletados.

A garrafa de Mariotte consiste em um reservatório de água capaz de aplicar carga constante a uma determinada região, volume. O instrumento apresenta basicamente dois tubos, o tubo de maior diâmetro é o reservatório, enquanto o tubo central, de menor diâmetro, transfere a carga atmosférica a um ponto do reservatório próximo ao solo. A carga aplicada será referente à diferença de cota entre a base do reservatório e a seção sob condição de pressão atmosférica. A garrafa de Mariotte utilizada no ensaio foi a projetada para o ensaio de Guelph da Soil Moisture Equipment e está detalhado na Figura 17.

O tensiômetro é um dos aparelhos capazes de medir a sucção mátrica do solo. Esse é composto de um tubo de acrílico vedado preenchido por água destilada, em que numa de suas extremidades há um transdutor de pressão (Figura 18) capaz de medir a pressão negativa (tensão) aplicada à água do tubo, onde na outra extremidade esteja conectada uma cápsula de porcelana porosa, que impeça a entrada de ar no tubo (desconsiderando efeitos de difusão). A sucção interna ao tubo é gerada pela transferência da água do tensiômetro para o solo até o equilíbrio de cargas. Ou seja, a tensão está relacionada ao quão conectada a água está ao solo e é uma estimativa da energia necessária para vencer as forças de capilaridade e gravitacionais do solo. (Singh e Kuriyan, 2003)

4.2.2. Metodologia

A metodologia de ensaio praticada no presente trabalho se divide em dois estágios sendo o primeiro o de montagem (7) e o segundo de execução (Tabela 8). As descrições sinalizadas em itálico são propostas para melhorar a qualidade do ensaio não tendo sido feitas em todos os ensaios realizados.

Tabela 7 – Tabela de montagem do ensaio por etapas

Montagem do equipamento	
Etapa 1	Planificação da área do ensaio para a acomodação do tripé do permeâmetro de Guelph (área variável (50-80) cm ²)
Etapa 2	Tradagem do furo do tensiômetro <i>e coleta das umidades, separando a última para servir junto à leitura de sucção do tensiômetro como ponto da curva característica</i>
Etapa 3	Instalação do tensiômetro e conexão do mesmo ao computador
Etapa 4*	Realização da cava cilíndrica (pode-se utilizar do trado do permeâmetro de Guelph)
Etapa 5	Montagem do permeâmetro de Guelph

*Pode-se utilizar também de uma cavadeira convencional tomando os devidos cuidados para tornar cilíndrico o volume da cava

Tabela 8 – Tabela de execução do ensaio por etapas

Execução do Ensaio	
Etapa 6	Gravar as leituras de sucção do tensiômetro no Laptop e utilizar um marcador para o início do ensaio, que caracteriza-se ao aplicar a carga hidráulica constante do permeâmetro de Guelph à cava cilíndrica
Etapa 7*	Medir as variações volumétricas no permeâmetro de Guelph
Etapa 8	Molda-se anéis, 3 ou mais, na superfície do terreno para a determinação da porosidade
Etapa 9	Ao verificar leituras de sucção próximas a 100 cm ou menores termina-se o ensaio
Etapa 10	<i>Findo o ensaio, trada-se um furo ao lado do tensiômetro para a determinação da umidade final.</i>
Etapa 11 **	Abertura de uma cava até a profundidade do tensiômetro para a retirada de novos anéis.

*Caso haja a necessidade de comparar os métodos, no presente estudo K_{sat} foi calculado a partir do método de Reynolds e Elrick (1975)

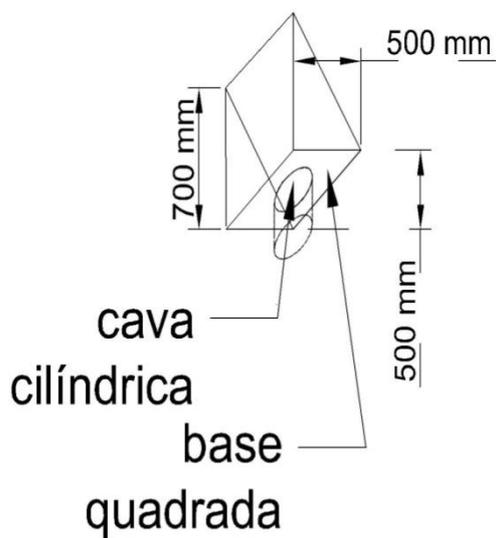
** Caso haja muita heterogeneidade no solo

4.2.3. Montagem

Para ajudar a estabelecer um método confiável, prático, rápido e adequado a cada situação foram propostas três configurações para a acomodação/orientação do tensiômetro, sendo elas, vertical(V), horizontal(H), e radial(R) como será descrito a seguir.

Na etapa 1, onde abre-se uma cava no talude para a acomodação da garrafa de Mariotte, pode ser vista na Figura 20.

(a)



(b)

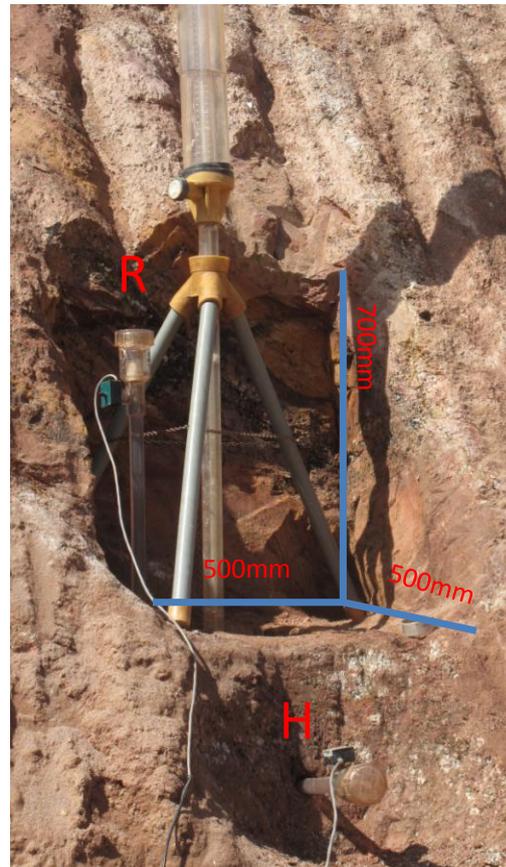


Figura 20 – Esquema (a) e aplicação (b) da cava para acomodação do tripé do permeâmetro de Guelph

As etapas 2 e 3 são realizadas antes da etapa 4 quando o tensiômetro não é inserido dentro da cava cilíndrica, ou seja nas configurações radial (R) e horizontal (H) como visto na Figura 20 (b) e Figura 22. Esta ordem contribui para diminuir o tempo de ensaio, pois assim que instalado o tensiômetro deve-se

esperar um tempo de aproximadamente 20 minutos até que haja equalização²⁴ entre a sucção do solo e do tensiômetro.

As etapas 2,3 e 4, tradagem do furo, instalação do tensiômetro e abertura da cava cilíndrica podem ser vistas nas Figura 20 (a) e Figura 21. A etapa 5, montagem do permeâmetro de Guelph, e findo o processo de montagem pode ser visto na Figura 20 (b).

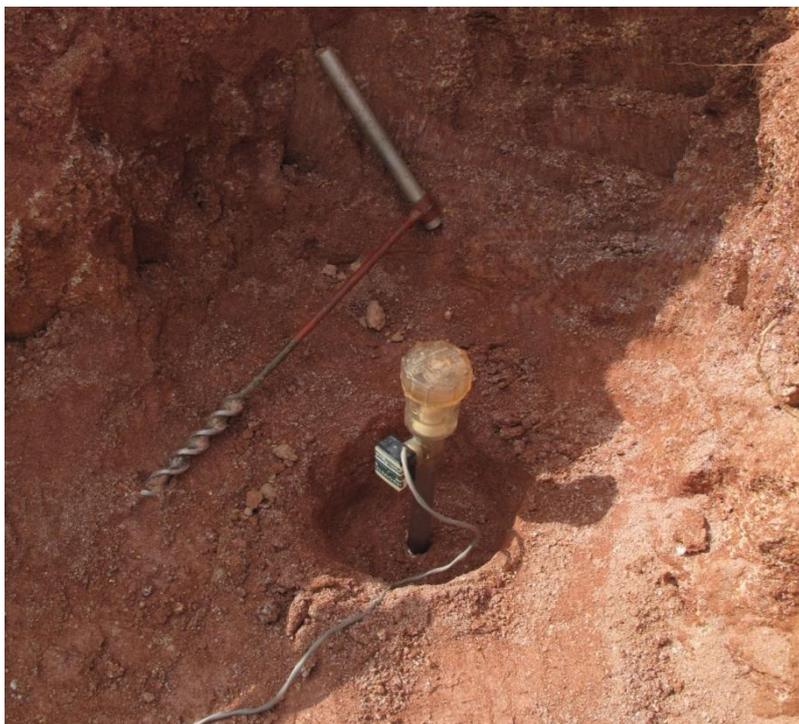


Figura 21 – Tradagem e instalação do tensiômetro na configuração vertical (V)

4.2.4. Considerações sobre a montagem

As dimensões da cava cilíndrica foram, em geral, de 16 cm de diâmetro e altura entre 10 e 30 cm para o uso de uma carga hidráulica que variou entre 5 e 20cm. As especificações de cada ensaio podem ser vistas no apêndice 2, incluindo os coeficientes de correlação associados. Reynolds e Elrick (1989) estabeleceram para os ensaios de permeâmetro de Guelph, que não há problema em utilizar-se de geometrias variadas.

²⁴ A equalização da sucção implica na interferência do tensiômetro à condição inicial, que considera-se desprezível.

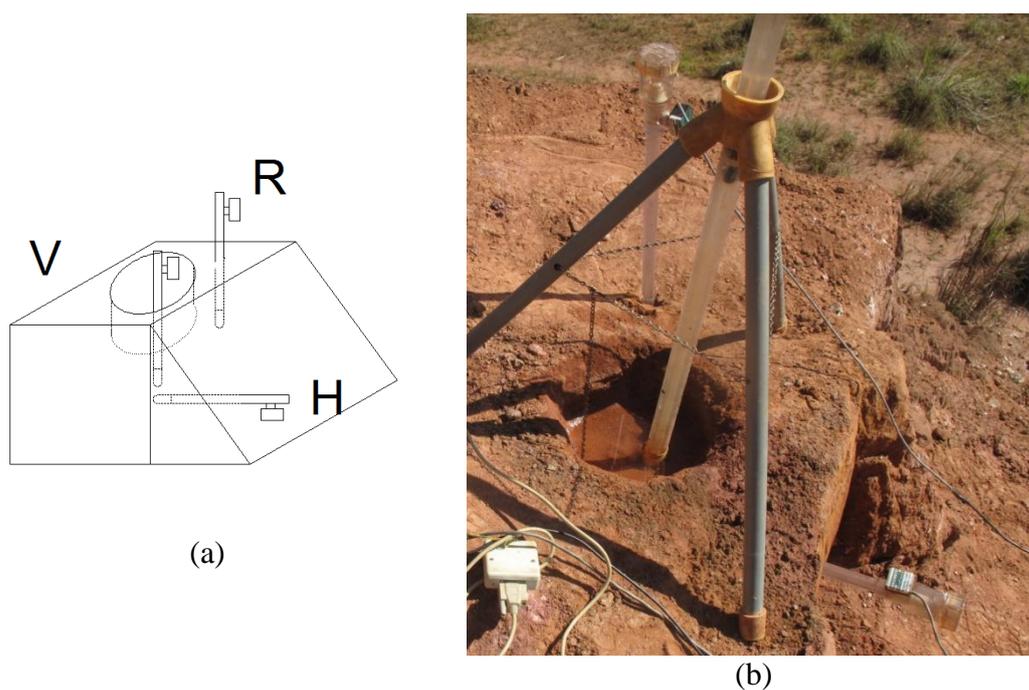


Figura 22 - Configuração de arranjos/orientação do tensiômetro

Sobre as configurações do posicionamento dos tensiômetros utilizou-se das seguintes arbitrariedades: na configuração vertical (V) posicionou-se dentro da cava cilíndrica, em seu eixo de simetria, a cápsula porosa do tensiômetro a uma profundidade entre 10 e 20 cm; na configuração horizontal (H) abriu-se uma cava auxiliar distante de aproximadamente 40 cm da cava cilíndrica, onde é feita a aplicação da carga, (usando esse valor como distância mínima necessária a evitar mudança na condição de contorno) e crava-se o tensiômetro na berma aberta de modo que a cápsula porosa fique centralizada com o eixo vertical da cava cilíndrica e fique a uma profundidade entre 5 e 20 cm; e por fim na configuração radial (R) utilizou-se para a profundidade da cápsula porosa um valor aproximadamente igual a da cava cilíndrica e distante radialmente com medida de 5 cm além do raio da cava, tomado com referência o eixo de simetria (apêndice 2). Orientações semelhantes foram apresentadas em Simunek e van Geuchten (1999) em um experimento com infiltrômetro de disco onde uma das observações foi a de que a configuração radial daria maior sensibilidade ao ensaio às custas de um tempo prolongado de ensaio.

Algumas ressalvas devem ser feitas quanto ao manuseio do equipamento para evitar danos e perdas. A cravação do tensiômetro deve ser realizada de forma precisa e restrita, o que implica na utilização de um trado de diâmetro levemente menor, para uma melhor uniformidade no contato entre a parede do tubo do tensiômetro e o solo²⁵.

Quanto ao manuseio do tensiômetro, não há problema em escolher profundidades rasas à cápsula porosa, porém deve-se ter cuidado ao acomodar a garrafa de Mariotte que pode transferir momento cortante à mesma, o que pode causar sua ruptura. Outro ponto a se considerar é a retirada do tensiômetro, que deve ser feito de forma rotacional (modelo RS 3, Figura 18) afim de evitar transferência de tensões de tração a cápsula porosa que possam causar sua ruptura. (Obs: a metodologia para a retirada do modelo T5, Figura 19, é diferente e não se deve rotacionar o instrumento)

4.2.5. Procedimentos de Laboratório

4.2.5.1. Caracterização física

A caracterização física constituiu-se de análise granulométrica, limites de consistência, peso específico dos grãos (G_s) e massa específica seca (ρ_d). A preparação das amostras foi feita usando a norma NBR 6457/84. A classificação dos solos foi feita segundo a USCS.

Para a análise granulométrica dos solos seguiu-se a norma NBR 7181/84. Salvo, a sedimentação em que foi usado o material passado na peneira #40, em substituição ao passado na peneira 10# que é recomendado pela norma e 50 gramas de material para todos os solos, para compatibilizar com o densímetro do laboratório da PUC-rio.

Para os ensaios de Limites, seguiu-se a norma NBR 6459/84, para o limite de liquidez e NBR 7180/84, para o limite de plasticidade, salvo, o material usado ser o passante na peneira #40.

²⁵ Aconselha-se para solos siltosos a argilosos (Martins, 2009), a aderência de uma pasta feita de material umidificado do fundo da tradagem. Este processo gera uma uniformidade no contato tensiômetro-solo porém também cria a necessidade de se esperar um tempo para redistribuição desta umidade. (o autor desconhece a aplicabilidade do método a materiais deste gênero, as tentativas feitas falharam).

Para os ensaios de densidade dos grãos utilizou-se como base a norma NBR6508/84, salvo o material usado ser o passado na peneira #40.

4.2.5.2. Caracterização Hidráulica

Foram realizados apenas 3 ensaios das propriedades hidráulicas em laboratório, sendo 1 de permeabilidade saturada e 2 de papel filtro.

O ensaio de permeabilidade saturada foi conduzido em câmara triaxial e parede flexível, com base na norma ASTM D5084/1997.

O ensaio foi conduzido seguindo os padrões do laboratório, em que se emprega uniformemente o papel filtro a duas extremidades (topo e base) de uma amostra indeformada, de dimensões de aproximadamente 4,6 cm de diâmetro e 2 cm de altura. As curvas foram traçadas apenas na trajetória de umedecimento no intuito de comparar com os ensaios de infiltração de campo. A técnica para seguir nesta trajetória foi secar ao ar previamente todas as amostras de campo e posteriormente umedecê-las tendo como base para saber a quantidade de água a adicionar a umidade de campo e a perda de umidade no processo de secagem. O peso do papel é medido em uma balança com 4 dígitos de precisão, e o tempo de equalização entre as pressões foi de 20 dias em recipiente adiabático. O papel filtro utilizado é o modelo Whatman 42, tendo com referência a consulta à norma D5298-03 (ASTM, 2003).