

7

Conclusões

7.1.

Característica dos solos

Os solos apresentados neste trabalho são em grande maioria residuais jovens e sua textura é, em geral, areno-siltosa ou arenosa; desta forma apresentaram-se com pouca ou nenhuma plasticidade. A fração areia varia de acordo com o grau de alteração do solo; quanto mais grossa menos alterado, existindo, ou por resíduo de veios, ou por grãos mais resistentes à fração pedregulho. Os locais ensaiados em escala macro são heterogêneos, mas se acredita que o volume ensaiado possa ter sido considerado como homogêneo, salvo alguns casos em que este fato possa ter influenciado o resultado. Solos muito arenosos e sem nenhuma coesão geraram colapso da parede do furo, o que possivelmente influenciou nos resultados.

7.2.

Aplicação do EIM

7.2.1.

Condição inicial

O EIM, quando realizado no período de estiagem, fornece em geral as funções de condutividade hidráulica e curva de retenção de 50 a 90 KPa (média de 57 KPa para o estudo). Pode-se observar que os valores de sucção estão de acordo com as condições de campo em outras regiões subtropicais do mundo e do Brasil (Brasil, Vieira e Marinho (2001), Singapura, Lim, *et al.*(1996) e um pouco acima de Hong Kong), e que há maior variação sazonal destes valores nos primeiros horizontes, cuja exposição às condições atmosféricas é maior. Sendo assim, os estudos de perfis de infiltração sugerem grandes variações de sucção anuais para profundidades rasas, ~0,5, m e alguma variação para profundidades em torno de 1m.

Para uma qualidade aceitável do EIM é necessário, portanto, realizar estimativas da distribuição de sucção em campo que favoreceriam a melhor data para a execução do mesmo. Por exemplo, é conveniente saber o tempo de estiagem necessário para atingir o valor de sucção desejado para o ensaio, o que é tarefa singular a cada área. Os locais estudados no Rio de Janeiro mostraram que as sucções observadas sofrem influência da face do talude, ou seja da geomorfologia e que inclui fatores como incidência de radiação solar, evaporação, precipitação e proximidade com a camada impermeável (ex: proximidade com o nível d'água). Smyth e Royle (2000) também associam maiores precipitações (menores Ψ_i) a rupturas de talude nas faces sul (40%), sudeste (15%) e sudoeste (15%) de Niterói, chegando a 70% das ocorrências estudadas.

7.2.2. Configuração do ensaio e aplicação do ensaio

O ensaio é adequado para realizar ensaios pouco profundos de até 1,5 m de profundidade (adaptado com cava lateral) usando uma configuração de ensaio radial.

A qualidade do resultado mostrou-se dependente da configuração do ensaio e da condição de inicial de umidade de campo como citado anteriormente na seção 6.4 principalmente no que se refere à sensibilidade do ensaio (não foi considerado no estudo à variação espacial de umidade). No aspecto da condição inicial pode-se dizer que os parâmetros obtidos em curvas de séries temporais começando a baixas sucções resultariam em prováveis grandes erros na estimativa de $\theta(\Psi)$ e $K(\Psi)$ para sucções acima do valor inicial medido.

Sobre a configuração do tensiomêtro no ensaio posicionamento do mesmo mais próximo ao furo pode diminuir o tempo de ensaio, contudo irá refletir menos nas condições de heterogeneidade do campo e pode influenciar nos parâmetros obtidos (Gribb *et al.* 2004). No entanto, o tempo de execução não deve ser considerado o fator preponderante e sim, a geometria, que deve ser definida em função do tipo de solo, e a provável, já que se desconhece as propriedades do solo, sensibilidade no ponto escolhido. Nos solos estudados o tempo máximo de ensaio foi de 7000 s (~ 2 horas) e o mínimo de 80 s (~1,5 min) (ver apêndice 3).

No estudo, a orientação R do tensiômetro foi a preferencialmente escolhida pela questão prática, muito embora o posicionamento sobre o eixo do ensaio, V ou H, produza, em geral, melhores coeficientes de correlação. Como questões práticas se entende evitar o possível fluxo preferencial na interface tensiômetro/solo, que pode ocorrer no posicionamento V do tensiômetro e o esforço em criar uma berma auxiliar, necessária para o posicionamento H.

Outra vantagem do posicionamento R ou H é a possibilidade de reduzir na ordem duas vezes o diâmetro do furo e logo o volume de água necessário, este fato é recomendável para solos mais permeáveis (K_s da ordem de 10^{-3} cm/s) onde o consumo de água é elevado. Diminuir o consumo de água pode evitar o processo de recarga reservatório, ação que pode produzir bolhas de ar no regime de fluxo tornando-o descontínuo. (Reynolds e Elrick, 1985)

Além disso, a configuração R possibilita a observação de pontos simétricos em relação ao eixo do ensaio (observado também em Simunek *et al.* 1999b), que contribui na quantificação da heterogeneidade do material e na escolha de uma função objetivo. Para o EIM, que é baseado em informações pontuais, a redundância de pontos medidos pode ser fundamental para uma análise média ou menos tendenciosa. (ex: diferentemente da retro-análise por infiltração acumulada que leva em conta toda a superfície do ensaio).

Outro ponto prático refere-se à garrafa de Mariotte usada, permeâmetro de Guelph, que se mostrou adequada aos ensaios em encosta por ser versátil. No entanto, como não foram utilizados os valores de vazão infiltrada para o EIM visto que não acrescentam a análise de estimativa de parâmetros tanto no quesito matemático de melhora da solução inversa tanto pela semelhança entre os resultados do cálculo semi-analítico (ex: Reynolds e Elrick, 1985), propõe-se o uso de um reservatório de Mariotte mais adequado e simples. Em termos de simplicidade entende-se por custo do equipamento, tempo de montagem e portanto tempo de execução. Outra vantagem do ensaio é o seu caráter semi-automático e, sendo assim, a adaptação do ensaio a outros modelos de garrafa de Mariotte, como exemplo que alimentassem diversos ensaios, poderia facilitar a representação de uma área com diversos ensaios simultâneos em batelada.

O autor também realizou o ensaio de infiltração monitorada (EIM) em laboratório, com escala de bloco indeformado, e com uso de mini-tensiômetros. Os resultados obtidos mostraram pouca diferença em relação à permeabilidade

encontrada em campo. Além disso apresenta vantagens associadas ao controle da umidade, podendo impor condições mais homogêneas e sucções mais baixas e o reuso do bloco para outros ensaios indeformados. Vale a ressalva que umedecer o solo alterará o estado de tensões sendo principalmente crítica em solos expansíveis ou colapsíveis e a reutilização do bloco pode não ser adequada. No estudo não houve tanta influência pois o solo foi retirado a 0,5 m de profundidade e apresenta pouco confinamento natural. Embora relevando o confinamento alguns estudos na literatura constataram que baixos valores do mesmo não alteraram significativamente a permeabilidade saturada.

Sobre as simulações numéricas, o autor considerou o processo de otimização utilizado na retroanálise tedioso (tentativa e erro), uma vez que a baixa sensibilidade do operador do programa aos parâmetros não saturados, sobretudo porque não houve boas correlações dos parâmetros com a textura dos solos, levou a estimativas iniciais longe do conjunto de parâmetros da solução e, que na prática, impossibilitaram/dificultaram a convergência.

Sendo assim, uma forma mais interessante para a retroanálise seria o uso de algoritmos mais poderosos como citado na seção 2.3.2 ou o uso de correções, se considerado os dados texturais, à estimativa inicial. No entanto, devido à complexidade de alguns algoritmos mais poderosos e o seu consumo de processamento, talvez, o seu uso, inviabilize (em tempo) a análise 2D (axissimétrica) e portanto, não seja de aplicação ao ensaio.

As simulações do fenômeno em 1D não foram satisfatórias pois estão condicionadas à geometria axissimétrica do ensaio, sendo observadas menores diferenças entre a simulação 2D quanto maior foi a relação Raio/Carga.

Em resumo observou-se que nenhuma geometria é de todo preponderantemente melhor do que a outra e que o ensaio está limitado as mesmas condições de solos que o permeâmetro de Guelph (seção 4.1.1). Todavia deve-se evitar o consumo excessivo de água, altos valores dos coeficientes de correlação e poucas informações sobre o ensaio e, a se adotar esses procedimentos, a configuração H ou mista se apresenta como a que melhor atende a esses quesitos. Sugere-se, com base nas experiências apresentadas a padronização do ensaio a diferentes configurações para diferentes tipos de solo, o que aperfeiçoaria a sensibilidade da técnica e que pode trazer outros benefícios como a mobilidade e adaptabilidade do ensaio.

Sobre a adição de outras informações a função objetivo, provenientes de outros ensaios ou de outras formas e grandezas, concluiu-se que dados do papel filtro apesar de produzir alguns bons resultados, nem sempre deram certeza sobre a melhora na estimativa dos parâmetros ou pela grande diferença na curva $\theta(\Psi)$ ou na incompatibilidade com a curva $\Psi(t)$, que representa o regime de fluxo.

7.2.3. Parâmetros hidráulicos

Os valores dos parâmetros α e n retro-analisados no EIM se encontraram a baixo da média dos valores presentes na literatura para a mesma textura e foram os que apresentaram maiores coeficientes de correlação. Na prática, isto significa que outros parâmetros podem satisfazer a solução, no entanto, acredita-se que a faixa de variação seja pequena para o problema abordado.

No que diz respeito ao parâmetro K_{sat} , o ensaio de Infiltração Monitorada apresentou valores semelhantes à solução semi-analítica de Reynolds e Elrick (1985) para vazões acumuladas do permeâmetro de Guelph. Estes valores também se encontram na faixa da literatura para solos residuais (10^{-4} a 10^{-6} cm/s). Os solos saprolíticos foram mais permeáveis e estiveram com K_{sat} na faixa de 10^{-3} cm/s, seguidos dos residuais jovens na faixa de 10^{-4} cm/s e por último os solos residuais maduros que não foram amostrados suficientemente.

A escolha de fixar (obter independentemente) θ_r e θ_s é necessária ao EIM, como mostrado no trabalho de Velloso (2000), e requer certas atenções, pois influenciam nos parâmetros obtidos.

Muitos autores fixam o parâmetro θ_r e o obtêm ou por funções de pedotranferência ou simplesmente o negligenciam. No estudo, essas atitudes em relação a θ_r parecem suficientes, pois sua variação não produz parâmetros muito discrepantes na medida em que o trecho estudado está próximo a saturação e inclusive não poderia ser representada pelo ensaio já que o ensaio é uma trajetória de umedecimento a partir da umidade natural.

Já o parâmetro θ_s se mostrou importante para a retroanálise e segundo a seção 6.7.4 deveria variar no máximo 12%. Resta para trabalhos futuros definir qual valor de θ_s deve ser utilizado, podendo ser a porosidade, como no presente trabalho, a porosidade efetiva ou outra definição (seção 6.7.4). Reforçando que este problema é endereçado na medida em que o ensaio nunca atingirá a saturação

(ex: Figura 2). Outro problema encontrado no estudo além da definição teórica da do parâmetro θ_s , foi a discrepância com a bibliografia nos valores de porosidade, que foram maiores no presente estudo. Sendo assim, o autor questiona a técnica de anéis utilizada no trabalho para obtenção da porosidade.

As análises de infiltração 1D mostraram que o solo residual jovem foi o que apresentou-se mais rapidamente saturado, no caso em que as condições iniciais em termos de sucção eram iguais. No caso em que as condições de saturação foram iguais o solo residual saprolítico saturou-se mais rapidamente apesar de haver pouca diferença em relação ao solo residual jovem. Observou-se também no solo saprolítico que precipitações intensas podem gerar poropressões positivas em apenas poucas horas.

7.3. Sugestões para trabalhos futuros

- Trabalhos que busquem definir melhor o problema inverso, principalmente na questão de unicidade sendo relevantes as considerações sobre adição de informações a priori, tanto em quantidade quanto em qualidade e desenvolver ou utilizar algoritmos mais eficientes (ex: genéticos, redes neurais, EAD) para resolver o problema inverso do EIM;
- Trabalhos que comparem a diferença entre a porosidade obtida por diferentes métodos e a relevância da suposição de sua relação com θ_s , assim como verificar se com informações adicionais há a possibilidade de retro-analisar todos os 5 parâmetros do modelo;
- Desenvolver metodologia ou equipamento que possa levar em conta solos com dupla porosidade, que não são incomuns nos solos Brasileiros (caso veja-se a necessidade de trabalhar além de 1000 cm de sucção);
- Desenvolver metodologia que favoreça a análise 1D;
- Comparar o estudo do EIM com ensaios de discos de tensão com instrumentação adaptada (tensiômetros e TDRs) e avaliar a diferença entre cargas positivas e negativas ao problema inverso;
- Ampliar a base de dados dos solos residuais do Rio de Janeiro;

- Visualizar a influência de heterogeneidades (umidade inicial, fluxo preferencial etc) no método;
- Ao adicionar novos dados à função objetivo é aconselhável também que sejam aprofundadas suas formas de construção e escolhas de decisão em casos de multiobjetivo (Merterns (2006) e Wöhling (2008));