

# Numerical and Experimental Study for Determining Hydraulic Parameters in Unsaturated Soils

Hemilly C. L. Fernandes<sup>1</sup>, Ruan G. S. Gomes<sup>2</sup>, Raquel Q. Velloso<sup>2</sup>, Eleonardo L. Pereira<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Ouro Preto

Campus Universitário s/n Morro do Cruzeiro, 35400-000, Ouro Preto – MG, Brasil

hemilly.fernandes@aluno.ufop.edu.br, eleonardo@ufop.edu.br

<sup>2</sup>Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Rua Marquês de São Vicente 225 Gávea, 22451-900, Rio de Janeiro - RJ, Brasil

ruan\_gomes93@hotmail.com, raquelvelloso@puc-rio.br

**Abstract.** Studies to determine the hydraulic properties of unsaturated soils, named soil water characteristic curve and hydraulic conductivity function, are generally carried out using laboratory measurements. Even though such experiments are capable of producing accurate results they are time consuming, labor intensive and may not represent large scales. In this context, this work sought to obtain the hydraulic parameters through inverse modeling from the Monitored Infiltration field tests. Such approach provides a simple way to merge observed data and models. The measurements for inversion procedures were carried out on a road embankment located in Ouro Branco, Minas Gerais. To solve the generated problem the Finite Element based Hydrus 2D software package was used to obtain the van Genuchten empirical parameters. In this process, the standard first order Levenberg-Marquardt optimization algorithm was used, which is a local search method that generates a set of candidate parameters around the initial values given by the user, which has the advantage of a high convergence rate. Thus, the empirical parameters  $\alpha$  e  $n$ , and the saturated permeability ( $K_{sat}$ ) were estimated, while the, residual volumetric moisture ( $\theta_r$ ) and saturated volumetric moisture ( $\theta_s$ ), were considered as known. Our results indicates that this type of test is an accessible and accurate choice to calibrate soil hydraulic parameters.

**Keywords:** unsaturated soils, inverse modeling, finite element method.

## 1 Introdução

Desde os primórdios das civilizações, os deslizamentos de terra sempre se fizeram presentes na vida do homem. Eles estão associados a períodos de chuvas intensas e uma das causas que explica a ocorrência dos escorregamentos é a redução ou eliminação da resistência ao cisalhamento do solo devido à redução da parcela de sucção em solos não saturados, gerada pela infiltração de água de chuva no solo.

A análise de fluxo de água em solos não saturados sob condição transiente exige o conhecimento das propriedades hidráulicas do solo. Com essas propriedades, é possível determinar a curva característica (ou curva de sucção) e a função de condutividade hidráulica do solo em estudo.

Solos não saturados se encontram preenchidos por água e ar e os compartimentos naturais que se encontram sob esta condição são controlados pelo processo de infiltração, os quais influenciam diversos processos da natureza, tais como, o fluxo de recarga de aquíferos, o transporte de contaminantes, estabilidade de encostas, dentre outros. Para adequadamente prever estes processos, um modelo matemático adequado se faz necessário.

Nos estudos de Richards [1] é apresentada a equação diferencial parcial governante que descreve este tipo de fenômeno e a distribuição de carga de pressão no domínio espaço-temporal. Devido a alta não linearidade desta equação, uma detalhada análise computacional se faz necessária. Além disso, para a solução é indispensável ter em mãos as relações constitutivas do solos, sendo estas, denominadas curva característica e função de condutividade hidráulica.

Estas relações são demonstradas por equações empíricas como as de Gardner [2], Brooks e Corey [3], van

Genuchten [4] e Fredlund e Xing [5] onde os seus parâmetros são obtidos tipicamente através de ensaios de laboratório. Apesar de produzirem resultados satisfatórios os ensaios de laboratório são comumente sensíveis, demorados e podem estar restritos a problemas de efeitos de escala. Dessa forma técnicas de inversão de parâmetros tem ganhado espaço por serem versáteis e produzirem resultados precisos.

As técnicas de inversão são uma alternativa poderosa para se obter parâmetros hidráulicos tendo em vista que podem se adequar tanto a ensaios de campo como de laboratório. Devido a maior fidelidade que se pode obter em ensaios de campo, principalmente no que diz respeito ao efeito de escala, a autora Velloso [6] propôs um ensaio com uma configuração simples e de rápida execução, denominado Ensaio de Infiltração Monitorado (EIM). Os dados obtidos através deste ensaio são interpretados com o auxílio de uma solução numérica, a qual soluciona a equação governante de acordo com as condições geométricas, iniciais e de contorno impostas pelo ensaio. Para encontrar os parâmetros um conjunto inicial é fornecido ao sistema, o qual por processo iterativo e um algoritmo de otimização atualiza sucessivamente os parâmetros para ajustar os dados de campo aos dados modelados. Por fim, o resultado final deste processo são os parâmetros determinísticos que melhor representam o solo em questão.

Tendo em vista o retratado acima, o presente estudo tem como principal objetivo alcançar através da retroanálise dos ensaios de campo EIM, utilizando o *software* Hydrus 2D [7], os parâmetros não saturados do solo, buscando descrever de forma satisfatória o comportamento da curva carga de pressão  $x$  tempo obtidos em campo em um talude rodoviário localizado em Ouro Branco, Minas Gerais e também traçar a curva característica e a função condutividade hidráulica do solo em estudo, de forma que tenham comportamento similar às exibidas na Figura 1, obtidas de Gomes [8].

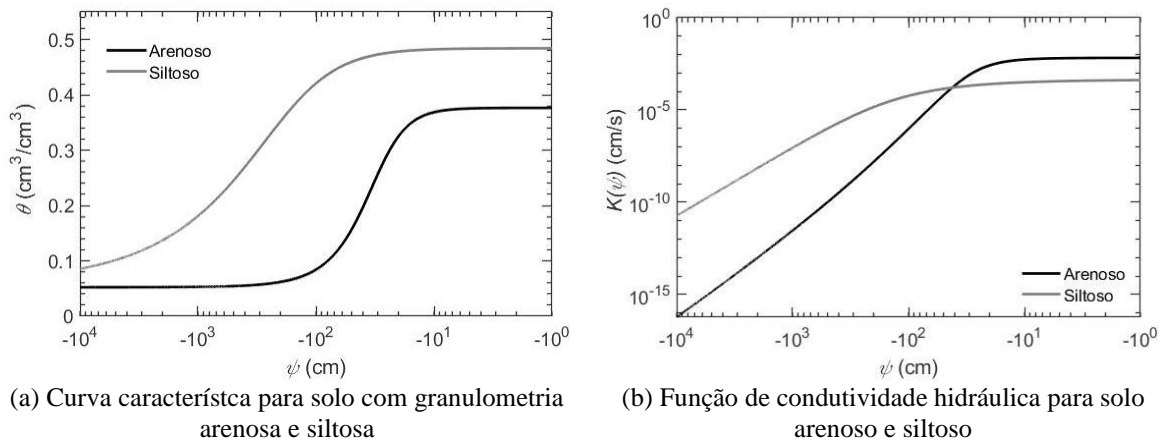


Figura 1. Curva característica e função de condutividade hidráulica típicas para solo arenoso e siltoso [8]

## 2 Modelagem inversa

Nas análises de problema direto, procura-se a solução da equação governante a partir das condições iniciais, de contorno e dos parâmetros do modelo. No problema inverso os parâmetros hidráulicos do solo não são conhecidos, mas medidas das variáveis dependentes dentro do domínio são usadas para estimar os valores numéricos dos parâmetros [6].

A modelagem inversa busca pelo vetor de parâmetros que ajusta os dados medidos em campo aos simulados numericamente. A sua formulação se dá de forma indireta, onde através de uma estimativa inicial dos parâmetros calcula-se a resposta do sistema e então avalia-se a diferença entre os dados medidos e simulados. Esse processo acontece através de uma função objetivo que deve ser minimizada. A modelagem inversa é formulada como sendo um problema de otimização, onde através da estimativa inicial dos parâmetros e por processos iterativos se busca pelo vetor de parâmetros que torna a discrepância entre os dados como a menor possível.

Para executar a estimativa de parâmetros em solos não saturados é necessário resolver a equação governante, a qual para fluxo não saturado é descrita pela equação de Richards [1], eq. (1).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} + 1 \right] = C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t}. \quad (1)$$

Onde  $x$  e  $y$  são variáveis espaciais,  $\psi$  é a carga de pressão,  $t$  é o tempo,  $K(\psi)$  é a função de permeabilidade saturada-não saturada e  $C(\psi)$  é capacidade de retenção ( $\partial\theta/\partial\psi$ ). Para solucionar esta equação diferencial parcial o programa Hydrus que funciona a partir do método de elementos finitos será utilizado.

Para modelagem com software Hydrus, foram estabelecidas condições de axissimetria em um furo de profundidade conhecida, limitado a uma dada carga de pressão positiva constante, que é imposta como parte do contorno do problema. Para a condição inicial foi considerado o valor de carga de pressão medido em campo, após a estabilização do tensiômetro. Na malha de elementos finitos considerou-se elementos triangulares de 1 cm de lado e para a condição de contorno, carga constante medida em campo para cada um dos ensaios, imposta pelo permeâmetro. Nas análises de Gomes [8] está exposto o estudo de malha que serviu de definição para a realização das simulações mostradas no presente trabalho.

Dentre as diversas equações empíricas que descrevem as relações constitutivas [2-5], o presente trabalho utiliza as equações de van Genuchten [4] onde a curva característica é esta descrita pela eq. (2) e a função de condutividade descrita pela eq. (3).

$$\theta(\psi) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \alpha\psi^n\right]^m} & ; \psi < 0 \\ \theta_s & ; \psi \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Onde  $\theta_r$  é a umidade residual,  $\theta_s$  a umidade saturada e  $m$  é o parâmetro adimensional de ajuste, aqui assumindo a hipótese comum de  $m = 1 - 1/n$ .

$$K(\psi) = K_{sat} \Theta^{0,5} \left[ 1 - \Theta^{1/m} \right]^2 \quad (3)$$

Em que  $K_{sat}$  é a permeabilidade saturada,  $\Theta$  é a umidade normalizada, isto é  $(\theta(\psi) - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ . Ao analisar a equação, percebe-se a dependência da permeabilidade tanto pela umidade  $K(\theta)$  quanto pela carga de pressão  $K(\psi)$ .

Para o processo de estimativa de parâmetros o algoritmo de otimização utilizado foi o de Levenberg-Marquardt, que é um método de busca local que gera um conjunto de parâmetros candidatos em torno de valores iniciais dados pelo usuário, e tem como vantagem a alta taxa de convergência. A rotina das etapas para a estimativa de parâmetros utilizando o algoritmo de otimização de Levenberg-Marquardt pode ser encontrada em Gomes [8].

Neste estudo, a partir de uma estimativa inicial dos parâmetros hidráulicos, o Hydrus calcula a carga de pressão e a função objetivo (soma dos erros residuais elevados ao quadrado) e computa a distância entre os dados observados e simulados. Em seguida, o algoritmo de otimização atualiza os parâmetros do solo visando a redução da função objetivo. A atualização dos parâmetros se repete por um número pré-estabelecido pelo usuário, o qual deve garantir o melhor ajuste do modelo numérico em relação aos dados observados.

Assim como nos estudos realizados por Gomes [8], Morales [9] e Pinto [10] os parâmetros  $\alpha$ ,  $n$  e  $K_{sat}$  do modelo de van Genuchten [4] foram determinados pela retroanálise, enquanto os outros parâmetros,  $\theta_r$  e  $\theta_s$ , foram considerados conhecidos de modo a facilitar a identificação dos demais parâmetros retroanalisados. No presente estudo, a estimativa inicial dos parâmetros hidráulicos foi obtida através do programa de pedotransferência chamado Rosetta [11]. Este programa fornece uma estimativa dos prováveis valores dos parâmetros hidráulicos a partir de dados texturais obtidos pelo ensaio de granulometria e dados de massa específica seca ( $\rho_s$ ). Sendo assim, é uma alternativa adequada para iniciar o processo de busca.

### 3 Ensaio de Infiltração Monitorado - EIM

Existem medições de campo ou laboratório que permitem aproximar os parâmetros hidráulicos para auxiliar na modelagem do fluxo de água sob condições não saturadas. Os métodos de medições são variados e alguns exemplos de medição em laboratório são o de placa de pressão e papel filtro. Em campo, um método comum a medição é permeâmetro de Guelph. Esses métodos permitem a obtenção de apenas uma relação constitutiva, curva característica ou de condutividade hidráulica. Já os métodos de análises inversas dos parâmetros, isto é, a estimativa de parâmetros, permitem obter as duas relações constitutivas e informações sobre a incerteza dos parâmetros através de um único ensaio.

Nesse contexto, Carvalho *et al.* [12] apontam em seu livro alguns métodos de laboratório que julgam serem comuns para essa determinação: a placa de sucção, a placa de pressão e o método do papel filtro.

O método da placa de sucção permite definir o trecho inicial da curva característica. A placa porosa, também denominada de placa de sucção, deve ter valor de entrada de ar adequada para a sucção imposta no ensaio, sendo aconselhável ainda, por Carvalho *et al.* [12], que este valor seja inferior a 40 kPa. Segundo os autores, placas porosas com valores de entrada de ar muito elevados, superiores a 70 kPa, podem ocasionar ensaios muito demorados devido à baixa permeabilidade do material poroso.

Conforme citado também por Rosa [13], outro método que Carvalho *et al.* [12] descrevem, é o da placa de pressão, ou câmara de Richards, que consiste em realizar uma mudança do referencial de pressão de ar, de modo a levar a pressão de água a valores acima do zero absoluto e, deste modo, contornar as dificuldades relacionadas a medir pressões negativas, devido ao fenômeno de cavitação.

O método do papel filtro, descrito no trabalho de Carvalho *et al.* [12], consiste na quantificação indireta, através da utilização de papéis filtro, da sucção matricial ou total do solo. Essa técnica, foi utilizada no trabalho de Oliveira [14], Maciel [15] e Pinto [10], e foi entendida pelo último como questionável na sua qualidade, tendo em vista que, a precisão da variável dependente, sucção, pode estar associada ao tempo de obtenção da mesma, que neste método é feita em dias, enquanto em outros métodos (como tensiômetro), é medida em segundos (tempo da passagem da frente de infiltração).

Ainda para as análises experimentais, Velloso [6], propôs o EIM, com configuração mais simples, para determinar o coeficiente de permeabilidade e parâmetros hidráulicos da zona não saturada do solo, que é objeto de estudo desse trabalho. Posteriormente ao trabalho de Velloso [6], Morales [9] também teve como foco o EIM. O objetivo da autora foi, através da realização do ensaio, determinar os parâmetros de fluxo e, assim, realizar a análise de fluxo saturado – não saturado em duas encostas, em duas e três dimensões, a fim de verificar a variação de fluxo nos casos. A autora realizou diversos ensaios de campo, utilizando um procedimento simples para a identificação de alguns parâmetros e procedeu a simulação de fluxo saturado – não saturado em dois taludes do Rio de Janeiro. Em seu trabalho, foi utilizado o programa Hydrus 2D/3D, desenvolvido por Simunek *et al.* [7].

O estudo realizado por Pinto [10], visou a obtenção de parâmetros hidráulicos dos solos não-saturados de maneira simples, rápida e pouco onerosa de 6 áreas ao longo do Rio de Janeiro. Os ensaios realizados por ele foram o EIM e caracterização física, e para efeitos comparativos também foram executados alguns ensaios de Guelph, papel filtro e permeabilidade saturada. O modelo de interpretação não-saturado usado, foi o de van Genuchten-Mualem, e a obtenção de três dos cinco parâmetros, foi realizada através de uma análise inversa. Assim como Morales [9], a ferramenta usada por ele para a retroanálise dos parâmetros, foi o programa Hydrus 2D/3D.

Por fim, Gomes [8] também utiliza o EIM para obtenção dos parâmetros não saturados do solo de três áreas do estado do Espírito Santo onde o autor estudou realizando a retroanálise no *software* Hydrus. Ele cita em seu trabalho que nem sempre a determinação dos parâmetros hidráulicos não saturados e laboratório representa efetivamente as situações observadas em campo, principalmente devido ao efeito escala.

A técnica utilizada para a obtenção dos parâmetros hidráulicos dos solos não saturados no presente estudo foi a realização de EIM, que foi retratada por Velloso [6] em sua dissertação de mestrado, e posterior análise inversa dos seus resultados. O ensaio consiste em uma proposta de ensaio de campo mais simples de ser executado do que o método que a autora utilizou inicialmente em seu trabalho e foi a forma de medição de campo para obtenção de dados de entrada para a análise inversa.

Os equipamentos necessários para executar o EIM são: tensiômetro e garrafa de Mariotte e Figura 2 representa a configuração do ensaio. Ele consiste em monitorar pontualmente a frente de infiltração, a partir de uma geometria simples. A resposta do ensaio, como citado por Gomes [8] e ilustrada na Figura 2 a direita, consiste em uma leitura linear que de inicia no momento da aplicação da carga constante (produzida pelo Permeâmetro tipo garrafa de Mariotte). Ao passo que o ensaio ocorre, o bulbo de saturação é formado imediatamente abaixo da base do furo. A medida que o bulbo avança a leitura permanece linear até que a frente de infiltração atinge a placa porosa de cerâmica do Tensiômetro. Neste instante o processo de saturação da cerâmica de inicia até que esta atinja valores próximos a zero.

Nesse ensaio, as condições iniciais de campo são altamente dependentes das condições meteorológicas. Segundo Pinto [10] as melhores estimativas são obtidas em condições iniciais entre -400 a -900 cm. Para que a condição inicial esteja dentro dessa margem o solo não deve permanecer exposto muito tempo ao solo, para não exibir uma condição muito seca e também não deve permanecer exposto à sucessivos eventos chuvosos para não indicar uma condição úmida.

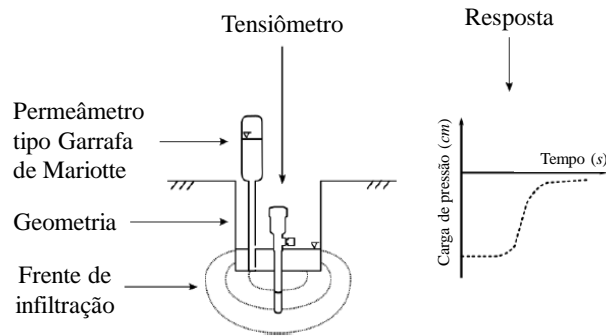


Figura 2. Configuração do ensaio EIM

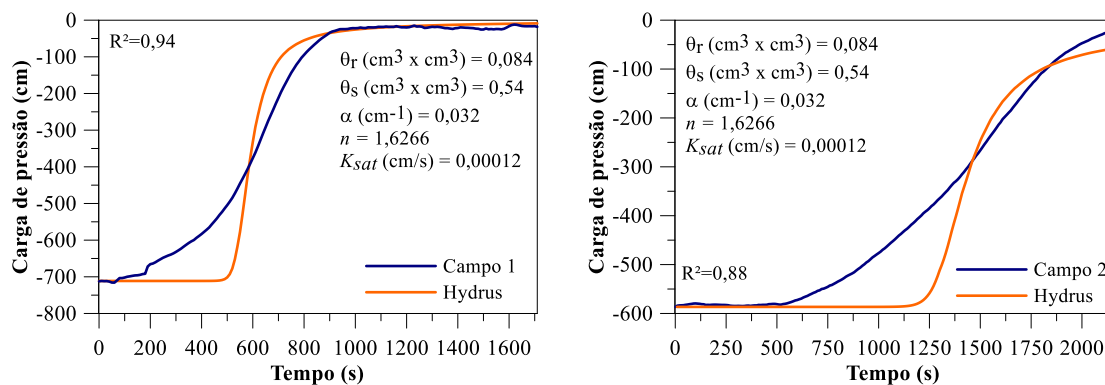
Outra variação importante é a profundidade de leitura. Solo mais resistentes causam certas dificuldades em cravar o tensiômetro e nesse sentido a profundidade de leitura deve se adaptar ao tipo de solo encontrado em campo. Toda a geometria do ensaio deve ser anotada para especificá-las na etapa da retroanálise numérica para manter a representatividade do ensaio.

Maiores detalhes sobre a execução do ensaio podem ser encontrados em Gomes [8].

## 4 Resultados

Na estimativa dos parâmetros hidráulicos não saturados, foram utilizados os dados dos ensaios de campo, denominados Campo 1 e Campo 2. Ressalta-se que o ensaio Campo 2 foi executado para confirmar os resultados obtidos através dos dados do primeiro ensaio.

A Figura 3a ilustra a resposta do ensaio campo 1. Essa simulação foi discretizada com 240 elementos triangulares 1D e 9588 elementos triangulares 2D, com 4915 nós. A geometria e a profundidade foram adaptadas para as condições encontradas em campo e a saturação da pedra porosa no ponto de observação ocorreu em 1710 s. Devido a esse ponto ser mais próximo da superfície, a frente de infiltração atingiu a pedra porosa rapidamente, mostrando um pequeno trecho linear e uma rápida saturação da pedra porosa.



(a) Gráfico comparativo entre ensaio de campo 1 e estimativa obtidas através do Hydrus (b) Gráfico comparativo entre ensaio de campo 2 e estimativa obtidas através do Hydrus

Figura 3. Resposta dos ensaios

A caracterização física do material do ensaio indica solo silto argilo-arenoso e esses dados granulométricos, juntamente com a massa específica, servem de entrada para o programa Rosetta, que está acoplado ao Hydrus, que permite estabelecer uma estimativa inicial. Com os conjuntos de parâmetros previstos pelo Rosetta e as condições de contorno, o próximo passo constituiu na simulação até se encontrar parâmetros otimizados. Para essas estimativas os parâmetros  $\theta_r$  e  $\theta_s$  foram fixados.

A previsão do comportamento do EIM está demonstrada na Figura 3a para o campo 1, promovido pela estimativa numérica do Hydrus 2D (curva laranja). Nota-se que entre o trecho de aproximadamente 200 e 500 s existe uma mudança no comportamento da curva observada, a qual oferece variações bruscas na carga de pressão. Esse fato pode estar relacionado a um possível fluxo preferencial ocasionado no contato solo-tensiômetro causado pela grande presença de raízes no local do ensaio. Porém, no que diz respeito as estimativas, é possível notar que o Hydrus aproximou corretamente o tempo para saturação da cerâmica porosa e a carga de pressão residual. A chegada da frente de infiltração medida em campo ocorreu em 200 s e pela simulação, foi superestimada, ocorrendo em aproximadamente 500 s. O parâmetro estatístico de ajuste  $R^2$ , que é a medida de ajuste do modelo variando entre 0 e 1, entre as curvas presente na Figura 3 reforça o bom ajuste promovido pela simulação por estar próximo a 1. Os parâmetros estimados pelo *software* estão especificados na Figura 3a.

A resposta do ensaio Campo 2 está apresentada na Figura 3b. Para a simulação foram utilizados 207 elementos triangulares 1D e 6684 elementos triangulares 2D, com 3449 nós. Da mesma forma que no primeiro ensaio, a geometria e a profundidade foram adaptadas para as condições encontradas em campo. Os dados granulométricos foram novamente inseridos no programa Rosetta para estimativa dos parâmetros iniciais e rotina para a simulação foi igualmente seguida. Na Figura 3b é possível observar que no Campo 2 a frente de infiltração já leva mais tempo para atingir a pedra porosa quando comparado ao ensaio denominado campo 1, atingindo em cerca de 500 s. A simulação superestimou a chegada dessa frente de infiltração, ocorrendo em aproximadamente 1250 s. No que diz respeito aos parâmetros estimados, a Figura 3b também expõe os valores para a simulação do ensaio Campo 2.

As curvas, característica e função de condutividade hidráulica, obtidas através da eq. (2) e eq. (3) e exibidas na Figura 4 para o solo siltoso, tem comportamento similar às curvas apontadas na Figura 1 para o mesmo tipo de solo, que pela granulometria mostrou-se siltoso.

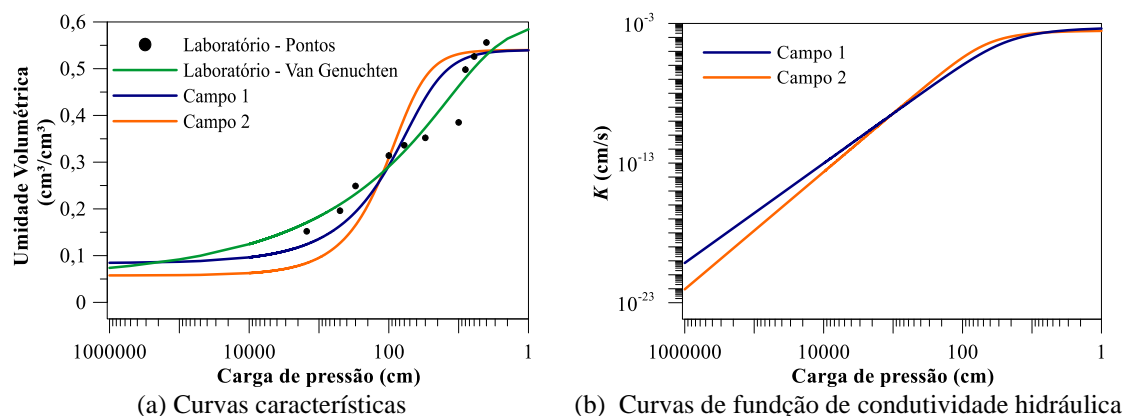


Figura 4. Curvas característica e de condutividade hidráulica estimadas através do Hydrus

Na Figura 4a também estão ilustradas as curvas características alcançadas em laboratório, pontos do ensaio e curva ajustada pelos parâmetros de Van Genuchten, a partir da eq. (2), pelo método de placa de pressão. Esse ensaio foi realizado a fim de servir como comparação com os resultados de campo. Ressalta-se que os dados de laboratório são obtidos com a amostra deformada e as condições de ensaio são bem distintas quando comparado ao ensaio de campo realizado para obtenção das informações que geraram os resultados numéricos.

## 5 Conclusões

O principal objetivo desse trabalho foi o de realizar estimativas dos parâmetros hidráulicos do solo não saturado numericamente, tendo como base dados de ensaios de campo e com os quais foi possível traçar de forma satisfatória as curvas característica e de condutividade hidráulica, demonstrando comportamento similar às curvas do mesmo tipo de solo apresentadas. Foi realizado também, com intuito de comparação, um ensaio em laboratório de placa de pressão que forneceu resultados ligeiramente divergentes aos das simulações devido ao fato das condições de ensaios serem distintas. A metodologia utilizada, o EIM, se mostrou adequada para a retroanálise dos parâmetros hidráulicos não saturados.

**Agradecimentos.** Os autores agradecem à UFOP/PROPP, PUC-RIO e a CAPES por todo o apoio dispensado durante a realização desse trabalho. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

**Declaração de autoria.** The authors hereby confirm that they are the sole liable persons responsible for the authorship of this work, and that all material that has been herein included as part of the present paper is either the property (and authorship) of the authors, or has the permission of the owners to be included here.

## Referências

- [1] RICHARDS, L.A. Capillary conduction of liquids through porous medium. *Physics*, 1, 1931.
- [2] GARDNER, W.R. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85(4):228–232, 1958.
- [3] BROOKS, R. H., COREY, A. T., 1964. *Hydraulic properties of porous media*. Colorado State University Hydrology Paper, pp. 8-37.
- [4] VAN GENUCHTEN, M. A. A., 1980. *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil*. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 44, n. 5, pp. 892-898.
- [5] FREDLUND, D. G., XING, A., 1994. *Equations for the soil-water characteristic curve*. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 30, n. 4, pp. 521-532.
- [6] VELLOSO, R. Q., 2000. *Estudo numérico da estimativa de parâmetros hidráulicos em solos parcialmente saturados*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, Brasil.
- [7] SIMUNEK, J., et al., 1998. Parameter estimation of unsaturated soil hydraulic properties from transient flow processes.
- [8] GOMES, R. G. S., 2019. *Modelo substituto para fluxo não saturado via regressão polinomial evolucionária: calibração com o ensaio de infiltração monitorada*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-RIO, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [9] MORALES, M.S.T., 2008. *Estudo Numérico e Experimental de Problemas de Fluxo Saturado – Não Saturado em solos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-RIO, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [10] PINTO, J. L. T. M. G., 2013. *Determinação de propriedades hidráulicas de solos residuais do Rio de Janeiro*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-RIO, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [11] SCHAAP, M. G., LEIJ, F. J., VAN GENUCHTEN, M. T., 2001. *Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties*. *Soil Science Society of America Journal*, pp. 847-855.
- [12] CARVALHO, J. C. et. al., 2015. *Solos não saturados no contexto geotécnico*. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – São Paulo, 759 p.
- [13] ROSA, F. A., 2017. *Um estudo de procedimentos numéricos e experimentais para uso no EIM.*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-RIO, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [14] OLIVEIRA, C. M., 2013. *Avaliação de mecanismo de ruptura em escorregamentos tipo Catarina em Nova Friburgo*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-RIO, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [15] MACIEL, I. C., 1991. *Aspectos microestruturais e propriedades geomecânicas de um perfil de solo residual de gnaiss facoidal*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-RIO, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.