

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE E CURVAS ESTIMADAS COM O PROGRAMA SEEP/W

Leone César Meireles², Eduardo Souza Cândido³, Gustavo Vinícius Gouveia⁴

Resumo: *As curvas de retenção de água (CRA) ou curvas características, que relacionam a variação do teor de umidade volumétrico com a sucção imposta, correspondem ao principal aspecto a ser determinado para representação do fluxo e da resistência em solos não saturados. As CRAs podem ser determinadas experimentalmente por meio de ensaios de laboratório (método do papel filtro, centrífuga, câmara de Richards, dentre outras) e/ou correlações propostas em literaturas ou softwares. O presente trabalho buscou avaliar curvas obtidas experimentalmente e curvas estimadas por meio programa Seep/W. A análise comparativa evidenciou que o uso da ferramenta de estimativa baseada em diâmetros característicos e nos limites de liquidez dos solos mostrou-se mais adequada que a baseada apenas na classificação granulométrica e uso de funções típicas de um banco de dados do programa. As ferramentas de estimativas mostram-se de simples utilização e muito adequadas para avaliações preliminares, uma vez que possibilita a identificação da relevância das CRA dos diversos materiais envolvidos em determinado projeto e, conseqüentemente, a otimização dos que necessitam serem ensaiados para obtenção das curvas reais.*

Palavras-chave: *Solos não saturados, Curvas características, Métodos de estimativa*

Introdução

A mecânica dos solos tradicional normalmente aborda os estudos dos solos nas condições saturada e seca. No entanto, esta abordagem se afasta e muito da prática da engenharia geotécnica, onde comumente se tem solos parcialmente saturados. Na mecânica dos solos não saturados, a forma com que

²Mestrando em Geotecnia pela Universidade Federal de Viçosa. e-mail: leone.meireles@ufv.br

³Doutorando em Geotecnia pela Universidade Federal de Viçosa. e-mail: eduardo.candido@ufv.br

⁴ Geólogo especialista em Geotecnia – PUC-MG. e-mail: geogouveia@yahoo.com.br

ocorre a concentração de água nos poros dos solos com a energia necessária para remover essa água corresponde à curva de retenção de água (CRA). Fredlund (2012) menciona que a CRA é o principal aspecto a ser determinado para implementação da mecânica dos solos não saturados na engenharia geotécnica. A forma das curvas é influenciada por vários fatores, dentre os quais se destacam a granulometria, a estrutura, a mineralogia, o grau de intemperismo e a temperatura. A determinação da CRA pode ser realizada em laboratórios por diversos procedimentos, como por exemplo, o uso de psicrômetro, tensiômetro, placas de pressão e sucção, papel filtro e centrifugação. Conforme Guimarães (2013), em geral, a obtenção experimental das curvas é demorada e onerosa.

Para análises com uso de solos não saturados, o programa Geostudio 2012, no módulo Seep/W, apresenta dois métodos para a estimativa das CRA. O objetivo do presente trabalho foi realizar uma avaliação comparativa da aplicação desses métodos com ajustes de CRA obtidas experimentalmente. Conforme mencionado no manual do programa, apesar de não ser uma prática recomendada, muitas vezes as funções de estimativas são adotadas em projetos executivos. Neste sentido, justifica-se a realização de análises comparativas com dados experimentais e avaliação dos percentuais de erro que essa prática pode acarretar.

Material e Métodos

As curvas experimentais utilizadas foram obtidas por Cândido et al. (2014), que apresenta CRA de três amostras de um solo residual de gnaiss, de diferentes granulometrias, típicos da região de Viçosa, Minas Gerais. Os autores utilizaram dois procedimentos distintos para obtenção de cada CRA: uso de uma centrífuga, para as menores faixas de sucção, e o método do papel filtro, para maiores faixas de sucção. Utilizou-se uma centrífuga de pequeno porte, comumente utilizada em aplicações médicas, na qual se submeteu as amostras dos solos, inicialmente saturadas, à centrifugação e consequente umidade decrescente ao longo do eixo de rotação. Posteriormente os autores correlacionaram a sucção causada pelo efeito da centrifugação a partir de equações apresentadas no trabalho de Freitas Júnior e Silva (1984 apud Cândido et al., 2014). Devido às limitações da centrífuga de pequeno porte, as CRA

foram obtidas com essa técnica até faixas de sucção de aproximadamente 250 kPa. Para as faixas de maior sucção os autores utilizaram o método do papel filtro, conforme ASTM D-5298-03.

Têm-se na literatura vários modelos com pretensão de ajustes das CRA. Conforme Júnior, Marinho e Soto (2015), tradicionalmente, as CRA são representadas por equações pré-definidas e dados obtidos em laboratório. Desta forma, com a estimativa de funções contínuas, possibilita-se a implementação de análises numéricas para previsão de diversas propriedades dos solos não saturados. Dentre os vários modelos de ajuste das CRA, Cândido et al. (2014) utilizaram os modelos de Garden (1958) e van Genuchten (1980) para ajuste dos dados obtidos em laboratório das três amostras ensaiadas. Apesar de ambos os modelos apresentarem ajuste satisfatório, o modelo de Van Genuchten (1980) apresentou menor percentual de erro.

O Seep/W é um módulo do programa Geostudio, pertencente à empresa canadense Geo-Slope International Ltd, que possibilita a realização de estudos numéricos, pelo método dos elementos finitos, de percolação e dissipação de poropressão nos solos. Para as CRA o programa apresenta dois métodos para estimativas das mesmas. O primeiro método de estimativa, denominado *sample functions*, é baseado em um banco de dados do programa para diferentes classificações granulométricas. Utiliza como dados de entrada apenas a classificação granulométrica, o teor de umidade para condição saturada (q_s) e os limites de sucção máximo e mínimo que se deseja analisar. Já o segundo método, *Grain-size data*, baseia-se na granulometria do material. Utiliza-se como dado de entrada o teor de umidade para condição saturada (q_s), o limite de liquidez e os diâmetros característicos D_{10} e D_{60} . Conforme apresentado no manual do programa Seep/W, o método é baseado no trabalho de Aubertin et al. (2003), que apresenta um método para estimativa da CRA a partir de modificações do método de Kovacs (1981), de forma a melhor representar o comportamento de rejeitos de mineração. Outra modificação é realizada de forma a possibilitar a aplicação do método a solos argilosos, na qual se utiliza a redução progressiva do teor de umidade em altas sucções a partir do método proposto por Fredlund and Xing (1994). Primeiramente a função é desenvolvida em termos de grau de saturação e, posteriormente, correlacionada com o teor de umidade (GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD, 2012).

Desta forma, no presente trabalho realizaram-se as estimativas das CRA por meio dos dois métodos apresentados no Seep/W, e realizou-se a comparação com as CRA obtidas experimentalmente por Cândido et al. (2014); ajustadas pelo modelo de van Genuchten (1980).

Resultados e Discussão

Para o método de estimativa *sample functions* aplicou-se quatro funções típicas (Tabela 1). Observa-se que o uso das funções típicas acarreta em elevados percentuais de erro, mesmo quando se considera as funções mais correspondentes à classificação granulométrica das amostras. De uma maneira geral, o método *Grain size data* acarreta em percentuais de erro menores, no entanto, necessita-se de mais informações referentes ao solo para sua aplicação.

Tabela 1 - Porcentagem de erro entre as curvas estimadas (Seep/W) e experimentais (Cândido et al., 2014).

Métodos de estimativa	Amostra 1: Argila siltosa	Amostra 2: Areia fina siltosa	Amostra 3: Silte arenoso
Função típica: Argila ¹	8,0	10,3	9,9
Função típica: Argila siltosa ¹	18,2*	12,7	22,9
Função típica: Silte ¹	29,3	24,6	34,5*
Função típica: Areia siltosa ¹	-	37,0*	45,8
Função (Granulometria) ²	20,1	17,8	12,9

¹Método *sample functions*; ²Método *Grain-size data*; * Percentuais de erro com uso da função típica correspondente à classificação granulométrica da amostra.

Conclusões

As estimativas das CRA realizadas no programa, tanto para o método *sample functions* como para o método *Grain-size data*, evidenciam que os métodos não devem ser utilizados para projetos executivos. As estimativas a partir do banco de dados do programa, com funções típicas para solos de diferentes classificações granulométricas (método *sample functions*), não apre-

sentaram concordância com os dados de laboratórios das amostras analisadas. Sua utilização acarretou em percentuais de erro com média de aproximadamente 30% e desvio padrão superior a 10. Já as estimativas realizadas a partir de diâmetros característicos e do limite de liquidez (*Grain-size data*), acarretaram em percentuais de erro com média de aproximadamente 17% e desvio padrão de 3,6. Este último mostrou-se, portanto, um método mais adequado para as estimativas das CRA das amostras analisadas.

Portanto, a estimativa das CRA serve como diretriz para projetos geotécnicos em meios não saturados, e principalmente como uma ferramenta para prescrição e direcionamento na seleção de amostras a serem ensaiadas em laboratório; para posterior aplicação a níveis de projetos executivos.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Saulo Gutemberg Silva Ribeiro e à Geo-Slope Internacional Ltd. por conceder temporariamente a licença plena do programa GeoStudio 2012.

Referências Bibliográficas

ASTM D-5298-03. **Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter Paper**. [S.l.]. 2003.

CÂNDIDO, E. S. et al. **Determinação de Curvas Características Utilizando uma Pequena Centrífuga e o Método do Papel Filtro**. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG. Goiânia. 2014.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M. D. **Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice**. 1ª. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.

GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD. **Seepage Modeling with SEEP/W**. Calgary, p. 199. 2012.

GUIMARÃES, L. M. **Determinação das Propriedades Hidráulicas em Solos**

Não Saturados Utilizando uma Centrifuga de Pequenas Dimensões. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 135. 2013.

JUNIOR, G. D. F. N. G.; MARINHO, F. A. M.; SOTO, M. A. A. A curva de retenção de água de materiais porosos. In: CARVALHO, J. C. D., et al. **Solos não saturados no contexto geotécnico.** São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. Cap. 9, p. 205 - 229.