

Avaliação das relações de condutividade hidráulica em solos brasileiros não saturados

Gerscovich, D. M. S.⁽¹⁾, Guedes, M. N.⁽²⁾

⁽¹⁾ Professora Adjunta, Departamento de Estruturas e Fundações, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, deniseg@uerj.br

⁽²⁾ Aluna de Mestrado em Engenharia Civil, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, michelleng@ig.com.br

Resumo: A modelagem numérica de processos de fluxo em meios não saturados requer a estimativa das relações entre teor de umidade, sucção e condutividade hidráulica. Vários pesquisadores propuseram modelos matemáticos para reprodução dessas relações. Estudos anteriores, publicados pelos autores, mostraram que a equação proposta por Gardner era a mais adequada para ajuste de curvas características de solos brasileiros. Este trabalho tem por objetivo apresentar proposições matemáticas para modelagem da relação entre condutividade hidráulica e sucção/teor de umidade e resultados preliminares na avaliação de sua aplicabilidade a solos brasileiros. Dez proposições foram analisadas, utilizando resultados experimentais de dois solos diferentes. Foi utilizada uma metodologia de otimização da determinação dos parâmetros de ajuste, baseada na técnica de algoritmos genéticos. A maioria dos modelos não apresentou resultado satisfatório, sendo que os modelos de Brooks e Corey e Arbhahirama & Kridakorn se mostraram os mais adequados.

Abstract: Numerical models for simulating unsaturated flow processes require the evaluation of the relationships between water content, soil suction and hydraulic conductivity. Several researchers have proposed equations for mathematically reproducing these relationships. Previous studies by the authors have indicated that the equation proposed by Gardner was the most convenient for estimating the characteristic curve for soils from Brazil. This paper shows ten different hydraulic conductivity equations and begins a discussion of their application on two soils from Brazil. An optimization methodology was used for the evaluation of curve fitting parameters. Most of equations did not present a satisfactory result. However, the equations proposed by Brooks e Corey e Arbhahirama & Kridakorn (1968) were more suitable for estimating the hydraulic conductivity function.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento do padrão de fluxo em solos é uma informação fundamental, que muitas vezes determina a escolha da solução de um projeto geotécnico.

O fluxo em solos ocorre através de canais irregulares e tortuosos, formados por poros quase totalmente conectados.

Em solos não saturados o fluxo depende da variação da área efetiva de passagem da água, que está sujeita a forças devidas à tensão superficial, cuja importância aumenta à medida que os poros de menor diâmetro vão sendo ocupados pelo ar.

A modelagem matemática de processos de fluxo em solos não saturados requer o conhecimento dos parâmetros hidráulicos; isto é, das relações entre umidade, sucção e condutividade hidráulica. Em particular, a relação entre teor de umidade

volumétrico (θ) e sucção (Ψ) é conhecida como curva característica.

Existem diferentes técnicas de ensaios de campo e de laboratório para determinação dessas relações. Estas técnicas, entretanto, não são de uso corrente devido aos longos tempos e elevados custos de execução. Face a esta dificuldade, pesquisadores vêm propondo modelos matemáticos, na tentativa de reproduzir as relações entre os parâmetros hidráulicos. Estes modelos requerem o conhecimento prévio dos teores de umidade saturado e residual, da sucção de entrada de ar e da condutividade hidráulica saturada, além de parâmetros de ajuste.

Estudos anteriores se concentraram na avaliação da adequação das equações de modelagem da curva característica (Gerscovich, 2001; Gerscovich & Sayao, 2002, Gerscovich et al, 2004). Os resultados indicaram que as equações propostas por Gardner

(1958), Van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994) forneciam um bom ajuste das curvas experimentais de solos brasileiros. Dentre estes, o modelo de Gardner (1958) mostrou-se o mais conveniente, já que requer o menor número de parâmetros de ajuste. Adicionalmente, observou-se a variabilidade da curva característica ao longo de um mesmo perfil de solo e, conseqüentemente, a dificuldade de se definir uma única relação entre θ x Ψ para descrever o comportamento de uma determinada camada de solo.

Este trabalho tem por objetivo apresentar diversas proposições matemáticas para modelagem da relação entre condutividade hidráulica (k), umidade (θ) e sucção (Ψ) e avaliar sua aplicabilidade a solos brasileiros.

2. CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

A condutividade hidráulica (k), mais comumente denominada permeabilidade, é uma propriedade que indica a maior ou menor facilidade de percolação de fluido através do solo. Por definição k é a velocidade de percolação quando o gradiente hidráulico é igual à unidade.

Esta propriedade pode variar em função do líquido percolante e de aspectos relacionados ao arcabouço sólido. A interferência do líquido percolante está diretamente ligada a sua viscosidade (ν); quanto menor ν mais facilmente o fluido escoar pelos vazios do solo. Já a influência da fase sólida está associada à composição granulométrica (tamanho da partícula e mineralogia), estrutura e grau de saturação.

Na condição saturada, a determinação experimental da condutividade hidráulica (k_{sat}) é relativamente simples (Cedergreen, 1977). Paralelamente, encontram-se, na literatura, algumas proposições matemáticas para determinação de k_{sat} em função de outros parâmetros. Taylor (1948) sugeriu a expressão

$$k_{sat} = D^2 \frac{\gamma_w}{\mu} \frac{e^3}{1+e} C \quad (1)$$

onde D = diâmetro dos grãos do solo, γ_w = peso específico do líquido, μ = viscosidade do líquido e C = coeficiente de forma.

Hazen (1911) propôs, para areias uniformes, a estimativa de k_{sat} em função do diâmetro efetivo (D_{10} em cm):

$$k_{sat} = 100.D_{10}^2 \quad (2)$$

Na condição não saturada, a determinação experimental é mais complexa, pois envolve equipamentos especiais e elevado tempo de execução (Fredlund e Rahardjo, 1993). Face a esta dificuldade, vários pesquisadores propuseram equações para representar matematicamente as relações entre $k \times \theta \times \psi$.

A Tabela 1 resume algumas destas proposições. Observa-se, nesta tabela, que a maioria das equações baseia-se em pontos especiais da curva característica (teores de umidade volumétrico saturado e residual e sucção de entrada de ar). São também necessárias informações relacionadas à condutividade hidráulica saturada e a definição de parâmetros de ajuste. Verifica-se ainda que a proposta de Leong & Rahardjo (1998) é semelhante às de Irmay (1954) e Brooks e Corey (1964).

Outros autores (Green & Corey, 1971; Jackson, 1972; Fredlund e Rahardjo, 1993) propuseram equações que requerem o conhecimento da curva característica, numa ampla faixa de sucções, além de parâmetros relacionados à estrutura (porosidade, índice de vazios). Estas proposições, entretanto, não foram incluídas no presente trabalho.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS EM SOLOS BRASILEIROS

A dificuldade de determinação experimental da condutividade hidráulica em solos não saturados pode ser traduzida pela escassez de dados disponíveis na literatura.

No presente trabalho as proposições foram avaliadas utilizando-se resultados de 2 campanhas experimentais.

Reichardt, et al (1976) realizaram ensaios em amostras extraídas de campo experimental da Escola Superior de Agricultura, Universidade de Piracicaba. Os autores determinaram a curva característica no campo, através de medidas simultâneas de tensiometria e umidade volumétrica (sonda de nêutrons), durante um processo de infiltração unidimensional, sob condição de regime permanente. O estudo foi limitado a uma camada de solo superficial de 1,65m de espessura.

A condutividade hidráulica saturada foi medida na superfície do terreno e a não saturada foi estimada em função das variações de umidade, seguindo metodologia proposta por Davidson et al (1969); isto é:

$$k(\theta) = \frac{S(t_i) - S(t_j)}{(t_j - t_i) \frac{\partial \psi}{\partial z}} \quad (3)$$

Tabela 1 – Proposições para Modelagem da Curva Característica

Modelo	Equação	Definição de variáveis
Gardner (1958)	$k = \frac{k_{sat}}{1 + a \left(\frac{\Psi}{\rho_w g} \right)^n}$	Ψ = Sucção a e n= parâmetros de ajuste ρ_w = densidade da água g = aceleração gravitacional
Brooks e Corey (1968)	$\begin{cases} k(\Psi) = k_{sat} \left(\frac{\Psi_b}{\Psi} \right)^\eta \rightarrow \Psi > \Psi_b \\ k(\Psi) = k_{sat} \rightarrow \Psi \leq \Psi_b \end{cases}$	Ψ_b = sucção de entrada de ar Ψ = sucção η = parâmetro de ajuste
Arbhabhirama & Kridakorn (1968)	$k = \frac{k_{sat}}{\left(\frac{\Psi}{\Psi_b} \right)^{n'} + 1}$	Ψ = Sucção Ψ_b = Sucção de entrada de ar n' = Parâmetro de ajuste
Davidson et al (1969)	$k = k_{sat} e^{[\beta(\theta - \theta_s)]}$	θ_s = teor de umidade saturado. β = parâmetro de ajuste
Campbell (1974)	$k = k_{sat} \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b+3}$	θ_s = teor de umidade saturado. β = parâmetro de ajuste
Mualem (1976)	$K_{rel} = \frac{[1 - (\alpha\Psi)^m (1 + (\alpha\Psi)^n)^{-m}]^2}{[1 + (\alpha\Psi)^n]^m} \rightarrow \Psi > 0$	$K_{rel} = k/k_{sat}$ m, n e α = parâmetros de ajuste Ψ = sucção
Mualem & Dagan (1978)	$k_{rel} = S_e^x \frac{\left(\int_0^\theta \frac{d\theta}{\Psi^{1+b}} \right)^2}{\left(\int_0^{\theta_s} \frac{d\theta}{\Psi^{1+b}} \right)^2}$	$K_{rel} = k/k_{sat}$ θ = teor de umidade volumétrico Ψ = Sucção. b = fator de tortuosidade
Van Genuchten (1980)	$k(S_e) = k_{sat} S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2$ $S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$	θ_r, θ_s = teor de umidade residual e saturado. S_e = grau de saturação no solo. m= parâmetro de ajuste l = 0,5
Leong & Rahardjo (1998)	$k_{rel} = \Theta^p \Rightarrow \Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$	$K_{rel} = k/k_{sat}$ Θ = teor de umidade normalizado θ_r, θ_s = teor de umidade residual e saturado. p= parâmetro de ajuste.
Vanapalli & Lobbezoo (2002)	$k_{rel} \approx 10^{(7,9 \log S_e^\gamma)}$ $\gamma = 14,08 \left(I_p \right)^2 + 9,4 \left(I_p \right) + 0,75$	$K_{rel} = k/k_{sat}$ S = grau de saturação I_p = índice de Plasticidade

onde

$$S(t_i) = \int_0^L \theta(z, t_i) dz \quad (4)$$

t = tempo

θ = teor de umidade volumétrico

Tibana e Campos (1994) realizaram ensaios de injeção de mercúrio em amostras compactadas, retiradas das pistas experimentais da barragem da UHE Corumbá I. A relação entre a condutividade hidráulica e sucção foi estimada por diferentes modelos analíticos, que utilizam resultados de ensaios de porosimetria, para se obter a

porcentagem de poros saturados para cada nível de sucção.

Um resumo da caracterização geotécnica de ambos os materiais está apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Caracterização dos solos

Caracterização dos solos	Local	
	Piracicaba	UHE Corumbá
ω_{campo} (%)	(*)	16,13
$\gamma_{t \text{ campo}}$ (kN/m ³)	(*)	22,28
n	(*)	0,28
S (%)	(*)	100
Argila (%)	(*)	27,58
Silte (%)	(*)	21,42
Areia (%)	(*)	50,25
LL (%)	(*)	33
LP (%)	(*)	24
Ψ_b (kPa)	1,00	1,00
θ_r	0,04	0,21
θ_s	0,35	0,28
k_{sat} (m/s)	1,38e-5	3,77e-7

Notas: (*) não fornecido; ω_{nat} = teor de umidade gravimétrico; γ_t = peso específico; n = porosidade; S = grau de saturação; LL e LP = limites de Atterberg; Ψ = sucção de entrada de ar θ_r = teor de umidade volumétrico residual; θ_s = teor de umidade volumétrico saturado

4. RESULTADOS

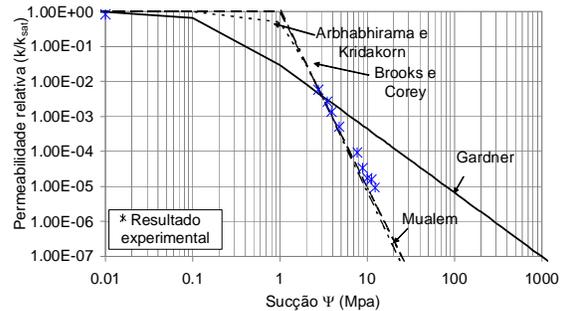
A aplicabilidade dos modelos de condutividade hidráulica foi avaliada a partir da comparação entre resultados medidos e previstos. Para tal foi elaborada uma planilha eletrônica, utilizando o programa EXCEL. Para otimizar a estimativa dos parâmetros de ajuste, associados aos diversos modelos, acoplou-se à planilha, um programa, denominado EVOLVER, baseado na técnica de algoritmos genéticos. Este programa estabelece um processo iterativo em que os parâmetros de ajuste são modificados na busca do erro mínimo (Gerscovich et al, 2004).

O modelo de Vanapalli e Lobezo (2002) só foi aplicado no solo de Corumbá, pela inexistência de informações experimentais relativas à caracterização do material de Piracicaba.

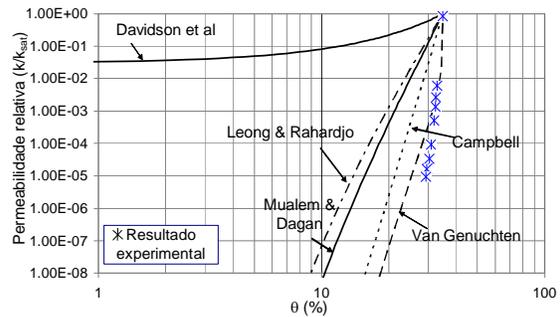
A Figura 1 mostra os resultados da previsão da curva de condutividade hidráulica para o solo de Piracicaba. Nesta figura, as proposições de Brooks & Corey (1968), Arbhabhirama & Kridakorn (1968) e Mualem (1976), definidas em função da sucção (Figura 1a), apresentam razoável concordância, com exceção da região de baixa sucção (< 2kPa).

No caso dos modelos descritos em função do teor de umidade volumétrico (Figura 1b), a equação de van Genuchten (1980) foi a que melhor reproduziu a curva experimental.

É interessante ressaltar que os ensaios, neste local, foram restritos à camada superficial, o que resultou em uma pequena faixa de variação de sucção, entre 2,5 e 12kPa. Esta limitação pode ter afetado negativamente a qualidade da modelagem. Leong e Rahardjo (1998) mostraram que bons ajustes de modelos requerem que os dados experimentais sejam representativos de uma ampla faixa de umidade, que compreenda desde a condição próxima à saturação até a condição de teor de umidade residual.



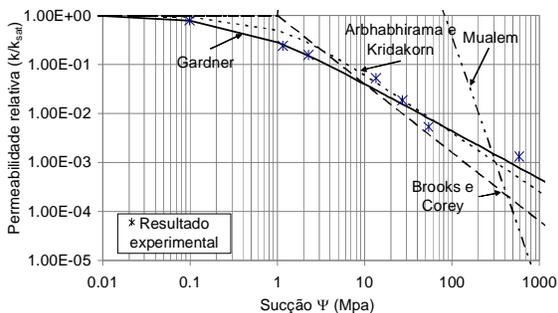
(a) função da sucção



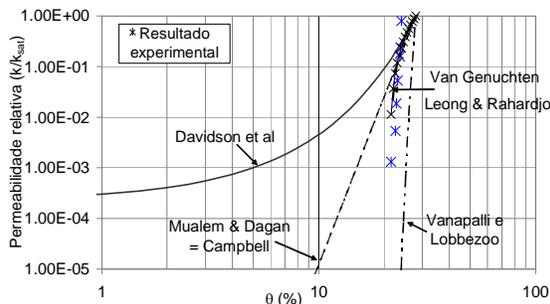
(b) função do teor de umidade volumétrico

Figura 1. Curvas de Condutividade Hidráulica – Solo de Piracicaba

No caso do solo compactado da UHE Corumbá I (Figura 2) os modelos definidos em função da sucção, diferiram significativamente da curva experimental, com exceção das proposições de Gardner (1958), Brooks & Corey (1968) e Arbhabhirama and Kridakorn (1968). No caso dos modelos baseados no teor de umidade volumétrico, não houve concordância para nenhum dos modelos analisados. Aparentemente, as proposições de van Genuchten (1980) e Leong & Rahardjo (1998) se ajustam ao resultado experimental; entretanto, há uma diferença na previsão da condutividade relativa da ordem de 10 vezes maior.



(a) função da sucção



(b) função do teor de umidade volumétrico

Figura 2. Curvas de Condutividade Hidráulica – Solo de Corumbá

A Tabela 3 resume os parâmetros dos modelos que melhor se ajustaram aos resultados experimentais.

Tabela 3 Parametros dos modelos

Modelos	Local	
	Piracicaba	UHE Corumbá
Gardner (1958)	a=0,49 n=1,83	a=0,27 n=0,98
Brooks & Corey (1968)	η=5,02	η=1,40
Arbhabharama & Kridakorn (1968)	n=5,03	n=1,20
Mualem (1976)	n=2,74 m=-0,16 α=4,03	n=2,61 m=-0,05 α=0,07
θ Van Genuchten (1980)	l=-6,22 m=0,08	l=1,5 m=10

5. CONCLUSÕES

Este trabalho examinou a aplicabilidade de algumas proposições empíricas para modelagem das relações entre condutividade hidráulica e sucção/teor de umidade.

Foram identificadas, na literatura, 15 proposições matemáticas, escritas em função da condutividade saturada e de parâmetros de ajuste. Adicionalmente, algumas requerem o conhecimento de pontos específicos da curva característica, enquanto que outras dependem do conhecimento prévio de ampla faixa da relação entre umidade e sucção. Dada a escassez de dados experimentais, o presente trabalho limitou-se às equações mais simples.

Os resultados mostraram uma grande variabilidade na qualidade do ajuste das curvas experimentais, sendo os menores erros observados com os modelos baseados na variação de sucção.

Os resultados mostraram que, dentre os modelos avaliados, o de Brooks e Corey (1968) e Arbhabharama & Kridakorn (1968) forneceram os melhores ajustes para os dois solos analisados.

Convém ressaltar que este estudo deve ser visto como resultado preliminar, face a limitação de dados experimentais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- Arbhabharama, A. and Kridakorn, (1968), Steady Downward Flow to a Water, Water Resources Res., Vol 4.
- Brooks, R.H. e Corey, A.T. (1964), Hydraulics Properties of Porous Media, Colorado State Univ. Hydrol. Paper n.3.
- Brooks, R.H. e Corey, A.T. (1968), Properties of porous media affecting fluid flow, J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng., 92 (IR 2), 61-66.
- Campbell, G.S. (1974), A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. Soil Science 117. 311-314.
- Cedergreen, R.H. (1977), Seepage, drainage, and flow nets, John Wiley & Sons, Inc..
- Davidson, J.M.; Stone, L.R.; Nielsen, D.R. e la Rue, M.E. (1969) Field Measurement and use of soil water properties, Water Resources Research, no.5 pp1312-1321.
- Fredlund, D.G. e Xing, A (1994), Equations for the soil water characteristic curve - Can. Geotechnical Journal 31(4) pp 521-532.
- Fredlund, D.G. e Rahrdjo, H (1993), Soil Mechanics for Unsaturated Soils – ed. John Wiley & Sons, Inc.

- Gardner, W.R. (1958), Some Steady-State of the Unsaturated Moisture Flow Equation with application to Evaporation from Water Table - Soil Science, No. 85, Vol.3, pp228-232.
- Gerscovich, D.M.S. Guedes, M. N e Toscano E. (2004), Evaluation of Soil-Water Characteristic Curves for Problems of Unsaturated flow in Soils from Brazil – Solos e Rochas, trabalho, vol 27, n 1, Janeiro – Abril, p. 57-67.
- Gerscovich, D.M.S. & Sayão, A.S.F.J. (2002), Evaluation of the soil-water characteristic curve for soils from Brazil – Int. Conf. Unsaturated soils, ed. Balkema, v. 1, 295-300.
- Gerscovich, D.M.S. (2001), Equações para Modelagem da Curva característica Aplicadas a Solos Brasileiros– 4º. Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, NSAT 2001, v.1, pp76-92.
- Green, R.E. and Corey, J.C. (1971), Calculation of hydraulic conductivity: a further evaluation of some predictive methods, Soil Sci. Soc. Amer. Proc, v 35, 3-8.
- Hazen, A. (1911), Discussion of Dams on Sand Foundations by A.C. Koenig, Transactions ASCE, v.73, p.199.
- Irmay, S. (1954), On the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Trans. Am. Geophys. Union, 35, 463-467.
- Jackson, R.D. (1972), On the calculation of hydraulic conductivity, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 36, 380-382.
- Leong, E.C. e Rahardjo, H. (1998), Review of Soil-Water Charact. Curve Eq., J. Geot. and Geoenv. Eng., dez., pp.1106-1117.
- Mualem, Y. (1976), A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resour. Res. 12(3), 513-522.
- Mualem, Y. and Dagan, G. (1978), Hydraulic conductivity of soils: unified approach to the statistical models, Soil Sci. Soc. Am. J., 42, 392-395.
- Reichardt, K., Gormann, F, Libardi, P. L. e Queiroz, S. V. (1976), Spatial Variability of Physical Properties of a Tropical Soil: II Soil Water Retention Curves and Hydraulic Conductivity , Boletim Técnico, Centro de Energia Nuclear na Agricultura - U.S.P, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 26 de abril ,Piracicaba – S. P.
- Taylor, D. (1948), Fundamentals of soil mechanics, John Wiley & Sons, New York, NY, USA.
- Tibana, S. e Campos, T. M. P de (1994), Determinação da Permeabilidade Não Saturada Por Injeção de Mercúrio. - X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. pp 421 428. Foz do Iguaçu.
- Vanapalli, S.K. e Lobbezoo, J.P. (2002), A normalized function for predicting the coefficient of permeability of unsaturated soils, UNSAT 2002, 839-844.
- Van Genuchten, M.Th (1980), A Closed Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils - *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, vol.44, no.5, pp892-898.