

Coeficiente de permeabilidade não saturado ao longo de um perfil de um solo coluvionar e laterítico de Campinas/SP

Benatti, J. C. B.

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo/Unicamp, Campinas, São Paulo, Brasil, jcbbenatti@yahoo.com.br

Bonder, B. H.

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo/Unicamp, Campinas, São Paulo, Brasil, bonder@odebrecht.com

Miguel, M. G.

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo/Unicamp, Campinas, São Paulo, Brasil, mgmiguel@fec.unicamp.br

Resumo: Esse trabalho apresenta as funções permeabilidade não saturadas (k) do perfil de solo coluvionar e laterítico, com espessura de 6,5m, do Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações (CEMSF) da Unicamp. As funções k foram obtidas pela aplicação do modelo matemático de Van Genuchten (1980), utilizando-se a rotina RECT (RETention Curve), elaborada por van Genuchten *et al* (1991), e por meio dos coeficientes de permeabilidade saturados e das curvas características de sucção de amostras indeformadas coletadas a cada metro de profundidade, a partir de 1,5m até 6,5m. Verificou-se que as funções permeabilidade não saturadas do perfil de solo são proporcionais ao teor de umidade gravimétrico e inversamente proporcionais à sucção matricial imposta, além disso, observou-se uma influência bastante forte da quantidade e do tamanho dos poros no comportamento da permeabilidade não saturada ao longo da profundidade do perfil do solo.

Abstract: The aim of this research is to present the unsaturated permeability functions (k) of a colluvial and lateritic soil profile with 6.5m thickness and located within the Soil Mechanics and Foundation Experimental Field at the State University of Campinas, Brazil. The unsaturated permeability functions were obtained by applying the van Genuchten (1980) mathematic model, using the RECT (RETention Curve) routine, which was elaborated by van Genuchten *et al* (1991). Moreover, saturated permeability coefficients and suction characteristics curves from undisturbed soil samples, collected at each meter of depth, beginning at 1.5m until 6.5m, were used. It was noted that the unsaturated permeability functions of the soil profile were proportional to the moisture content and were inversely proportional to imposed matric suction. In addition, a strong influence of porous quantity and size porous were observed on the unsaturated permeability behavior throughout the soil profile depth.

1. INTRODUÇÃO

Os solos lateríticos representam grande parte da cobertura das regiões sul e sudeste do Brasil. Em função das condições climáticas e geomorfológicas, esses solos apresentam elevada porosidade, baixo grau de saturação e podem apresentar

colapsibilidade. A laterização do solo se dá pela atuação de processos de alteração pedogenética, mais expressivamente pela lixiviação, que consiste na intensa migração de partículas sob a ação de infiltrações e evaporações, resultando em uma camada de solo superficial com elevada permeabilidade (Rodriguez *et al.*, 2007).

Os solos lateríticos argilosos, em sua maioria, apresentam características bastante particulares quando comparados aos solos estudados pela mecânica de solos clássica. Devido ao processo de formação, com grande atuação de processos pedogenéticos, esses solos têm uma textura diferenciada, normalmente caracterizada pela presença de grumos, que confere a eles propriedades hidráulicas de areias finas ou siltes. Além disso, normalmente apresentam-se acima do lençol freático, estando, portanto, na condição não saturada.

Os solos que se encontram no estado não saturado, sendo elementos porosos, possuem capacidade de reter água que está livre para se mover. A esta capacidade se denomina sucção. Segundo Richards (1928), a existência de sucção em solos não saturados é reconhecida como decorrente dos efeitos combinados de capilaridade (predominantes em solos arenosos), de absorção (predominante em solos argilosos) e de osmose (que têm a mesma importância relativa tanto no caso de solos saturados, como não saturados) e é devida a presença de íons dissolvidos na água.

A capacidade de sucção está ligada à mineralogia do solo, a densidade e ao teor de umidade, variando com a mudança destes parâmetros. Normalmente é medida em unidade de pressão (kPa, atm, bar), já que a sucção também pode ser definida como a máxima pressão que o solo, numa dada condição, pode exercer para absorver a água.

A sucção total é a soma de duas parcelas. A primeira delas é a matricial (devido a forças capilares e de adsorção) e a segunda é a osmótica (devido às diferentes concentrações de sais dissolvidos na fase líquida), de acordo com Fredlund & Rahardjo (1993).

O estudo da variação da permeabilidade em solos não saturados possui grande importância na análise de estabilidade de taludes. Os menores fatores de segurança podem ocorrer durante ou após uma precipitação, caracterizando uma trajetória de umedecimento ou de secagem, sem, no entanto, atingir a saturação.

Os ensaios para a determinação do coeficiente de permeabilidade não saturado (k) são bastante custosos e complexos. Diante disso, van Genuchten (1980) desenvolveu um modelo empírico a partir do qual é possível obter esse coeficiente utilizando-se as curvas características de sucção e o coeficiente de permeabilidade saturado do solo (k_{sat}).

Esse trabalho tem por objetivo determinar as funções k do solo do Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações (CEMSF) da Unicamp para uma camada de solo superficial, coluvionar e laterítica, de aproximadamente 6,5m de profundidade, analisando resultados de k_{sat}

(coeficiente de permeabilidade do solo saturado) e das curvas características de sucção de amostras coletadas a cada metro de profundidade, a partir de 1,5m até 6,5m.

1.1 Solo Estudado

O subsolo da região de Campinas/SP é formado por migmatitos básicos, ocorrendo rochas intrusivas básicas da Formação Serra Geral (diabásio), do Grupo São Bento, perfazendo 98 km² da região de Campinas, cerca 14 % de sua área total. Também são encontrados nesta região corpos de diabásio “encaixados na Formação Itararé e no Complexo Cristalino, sob formas de sills e diques” (Albuquerque *et al*, 2001).

O CEMSF apresenta um perfil de subsolo composto por uma camada superficial de argila siltosa, coluvionar, laterítica e colapsível, com, aproximadamente, 6,5 m de espessura, e por silte argilo-arenoso, até 20 m de profundidade, com camadas menos profundas de origem coluvionar e mais profundas de origem residual de diabásio. O nível d’água se apresenta a 17,0 m. Entre 6,5 m e 7,0 m de profundidade, aproximadamente, o perfil apresenta uma camada de material concrecionado (horizonte plíntico) constituído por uma areia argilo-siltosa, fina a média, pouco compacta, marrom amarelada (Miguel *et al.*, 2007). A Tabela 1 apresenta valores de peso específico natural (γ_{nat}) teor de umidade de campo (w_{campo}), índice de vazios (e), grau de saturação (S_r) e coeficiente de permeabilidade saturado (k_{sat}) do solo laterítico do CEMSF, para as profundidades estudadas (Miguel *et al.*, 2007b).

Tabela 1: Índices físicos do solo laterítico do CEMSF.

Índices Físicos	Profundidade (m)					
	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5
γ_{nat} (kN/m ³)	11,8	13,7	14,0	14,4	14,4	14,7
w_{campo} (%)	24,2	23,7	22,3	27,2	27,2	22,4
e	2,14	1,74	1,68	1,72	1,66	1,55
S_r (%)	33,7	44,3	40,7	46,8	41,1	44,2
k_{sat} (x10 ⁻³ cm/s)	4,6	3,5	1,8	1,7	1,0	0,78

1.2 Modelagem da Curva Característica de Sucção

Diversas equações empíricas foram propostas na literatura para modelar a curva característica de sucção. Em geral, essas equações são restritas a certos tipos de solos, com um formato particular da curva característica, ou faixas limitadas de sucção. A maioria das equações modela a função que correlaciona sucção com teor de umidade ou grau de saturação. No entanto, alguns modelos sugerem que a curva pode ser definida a partir da distribuição granulométrica e de propriedades físicas dos solos.

De modo geral, alguns parâmetros podem definir a forma geral da curva característica. O primeiro é o valor da umidade de saturação (θ_{sat} ou w_{sat}). O segundo é o valor da sucção, a partir do qual surgem os primeiros vazios não preenchidos com água, conhecido como valor de entrada de ar nos vazios $(u_a - u_w)_b$ ou ψ_b . Outro parâmetro é o valor de umidade residual (θ_r ou w_r), limite inferior da umidade a partir do qual qualquer aumento na sucção pouco afeta os valores de umidade. Por fim, tem-se o parâmetro λ , definido pela razão entre a variação de umidade e a variação de sucção (Cordão Neto *et al*, 2007).

1.3 Permeabilidade dos Solos Não Saturados

O coeficiente de permeabilidade é uma medida da capacidade do solo de transportar água. Para os solos não saturados ele depende dos mesmos fatores que influenciam esta propriedade nos solos saturados (Silva, 2005).

A determinação da função permeabilidade pode ser feita direta ou indiretamente. Os métodos diretos são realizados em ensaios de campo ou laboratório.

Na determinação de forma direta há dois métodos: um que admite o fluxo estacionário e outro fluxo transiente. No método estacionário, a sucção matricial é primeiramente imposta sobre a amostra do solo utilizando-se a técnica da translação de eixos. Quando em equilíbrio, um valor de gradiente hidráulico é aplicado na amostra. O fluxo é medido e a permeabilidade obtida utilizando-se a lei de Darcy. No método transiente, uma amostra de solo é sujeita a um fluxo de água. O gradiente hidráulico e a razão de fluxo em vários pontos da amostra são computados pela monitoração da umidade volumétrica ou da sucção (Cardoso Junior, 2006).

O uso de métodos indiretos se faz a partir da curva característica, sendo necessário também o coeficiente de permeabilidade saturado do solo. Uma vez obtida a curva característica de sucção do solo é possível estimar uma função permeabilidade (relação entre a permeabilidade do solo e a sucção atuante), utilizando-se de um procedimento estatístico que calcula a probabilidade de ocorrência de pares sequenciais de poros de todos os possíveis tamanhos (Cardoso Junior, 2006 e Silva, 2005).

1.4 Modelo Numérico de Van Genuchten

Van Genuchten (1980) propôs a equação (1) para descrever a umidade do solo em função de seu potencial matricial:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_{sat} - \theta_r}{\left[1 + |\alpha\psi_m|^n\right]^m} \quad (1)$$

onde θ_r é a umidade volumétrica residual ($m^3 xm^{-3}$), θ_{sat} é a umidade volumétrica de saturação ($m^3 xm^{-3}$), ψ_m é o potencial matricial (m), α (m^{-1}), n e m são parâmetros independentes que devem ser estimados por ajuste dos dados obtidos.

O autor observou que, para uma curva quase simétrica em forma de S, a inclinação ($d\theta/dh$) torna-se zero quando θ aproxima-se tanto de valores de saturação como de residual, ou seja, nesses extremos o gradiente é aproximadamente zero.

Para estimar $k(\theta)$, van Genuchten combinou a equação 1 com o modelo de Mualem (1976).

Considerando $m = 1 - \frac{1}{n}$ deduziu a equação (2):

$$k(\theta) = k_{sat} \omega^\ell \left[1 - \left(1 - \omega^m \right)^m \right]^2 \quad (2)$$

sendo que

$$\omega = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r}$$

onde ω é a saturação efetiva, k_{sat} é o coeficiente de permeabilidade do solo saturado e ℓ é um parâmetro empírico estimado por Mualem (1976) em 0,5, para a maioria dos solos (Hurtado, 2004).

1.5 O RECT (RETention Curve)

Van Genuchten *et al* (1991) afirmam que, além de facilitar a determinação da função permeabilidade, a utilização de funções analíticas na estimativa das características hidráulicas do solo também permite uma representação e comparação mais eficiente das propriedades hidráulicas dos solos. Essas funções também, ainda segundo o autor, são mais facilmente utilizadas em processos de escalonamento, caracterizando a variabilidade espacial das propriedades hidráulicas em todo o perfil. E, se for demonstrado que os resultados são fisicamente realistas, ao longo de um vasto número de teores de umidade, é possível utilizar métodos de extrapolação e interpolação para as curvas características e de condutividade hidráulica do solo.

Embasado nessas justificativas, van Genuchten *et al* (1991) elaboraram uma rotina computacional, na qual é possível escolher entre várias funções analíticas para estimar dados de retenção de água no solo e/ou de permeabilidade não saturada, ou ainda parâmetros de difusão.

2. METODOLOGIA

2.1 Amostras de Solo

Os ensaios para a obtenção das curvas características de sucção matricial foram feitos a partir de amostras indeformadas. Para tanto, foi aberto, no CEMSF, um poço de inspeção, seguindo os procedimentos descritos na NBR 9604/86. Nesse poço, foram coletadas três amostras indeformadas de cada metro de profundidade, a partir do primeiro 1,5m até 6,5m metros, somando um total de doze amostras. No momento da coleta das amostras, foi determinado o teor de umidade natural em campo, através do Ensaio da Estufa (NBR 6457/86).

2.2 Estimativa de k

Para a estimativa da permeabilidade não saturada das amostras de solo foi utilizada a rotina RETC, desenvolvida por van Genuchten *et al* (1991), com a aplicação da equação (2), anteriormente apresentada.

As curvas características de sucção matricial foram obtidas por meio da técnica de translação de eixos, em trajetórias de umedecimento e secagem (Bonder, 2008). Os parâmetros de modelagem dessas curvas foram obtidos por meio do modelo de van Genuchten (1980). Além disso, a rotina estabelecida pelo autor exigiu dados relativos à permeabilidade saturada do solo, que foram publicados por Miguel *et al* (2006) e determinados por meio de ensaios realizados à carga variável, em laboratório.

As funções de permeabilidade não saturada foram estimadas para o perfil de solo laterítico nas profundidades 1,5m a 6,5m.

3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 Curvas Características de Sucção Matricial

As Figuras 1 e 2 apresentam as curvas características de sucção matricial das amostras de solo estudado, para as trajetórias de umedecimento e secagem, ajustadas a partir da aplicação do modelo de van Genuchten (1980).

Das Figuras 1 e 2, observa-se que as curvas de sucção matricial nas trajetórias de umedecimento e secagem de uma amostra coletada numa determinada profundidade não se coincidem. Esse fenômeno é conhecido como *histerese* e é devido, principalmente, aos seguintes fatores: a) não uniformidade geométrica dos poros, b) efeito do ângulo de contato (maior, quando ocorre umedecimento do solo, e menor, na fase de

secagem), c) bolhas de ar capturadas nos vazios do solo, durante a fase de umedecimento e d) alterações na estrutura do solo, decorrentes da expansão ou contração, associadas aos ciclos de umedecimento ou secagem.

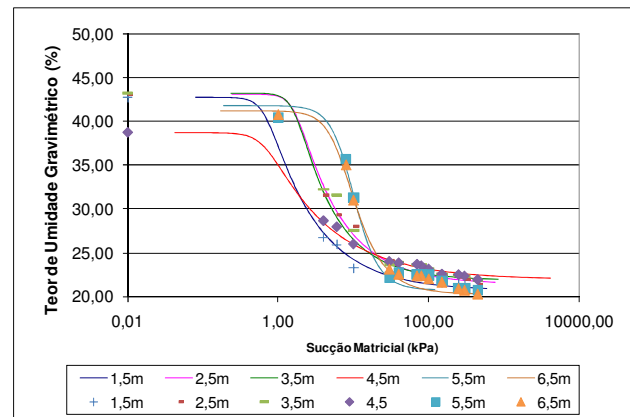


Figura 1: Curvas características de sucção em trajetórias de umedecimento do solo, para as profundidades estudadas.

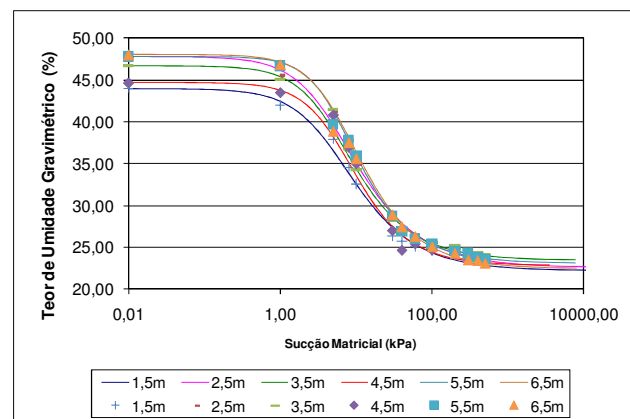


Figura 2: Curvas características de sucção em trajetórias de secagem do solo, para as profundidades estudadas.

3.2 Função Coeficiente de Permeabilidade (k)

As Figuras 3 a 8 apresentam a variação do coeficiente de permeabilidade não saturado k com o teor de umidade gravimétrico (w) do solo, para as trajetórias de umedecimento e secagem, nas profundidades estudadas. As Figuras 9 a 14 apresentam a variação do coeficiente de permeabilidade não saturado (k) com a sucção matricial do solo, para as trajetórias de umedecimento e secagem, nas profundidades estudadas.

Da análise das Figuras 3 a 8, verifica-se que, para valores altos de teor de umidade, o valor do coeficiente de permeabilidade do solo tende a um valor constante, valor esse que coincide com o coeficiente de permeabilidade saturado k_{sat} do solo. Esse valor de teor de umidade corresponde à

quantidade de água necessária para a saturação do solo, onde o valor de sucção é nulo. Para valores baixos de teor de umidade, o coeficiente de permeabilidade não saturado do solo aproxima-se de zero.

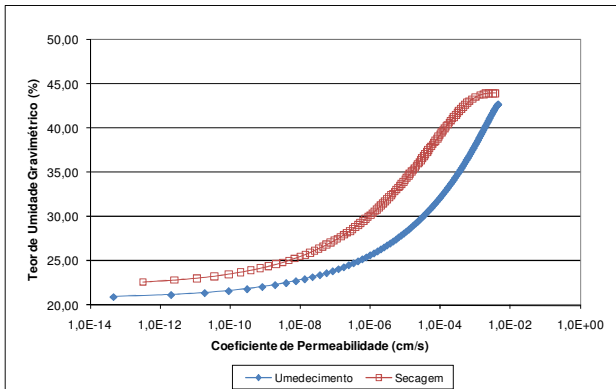


Figura 3: Variação do coeficiente de permeabilidade não saturado com o teor de umidade gravimétrico do solo, para as trajetórias de umedecimento e secagem, à profundidade de 1,5 m.

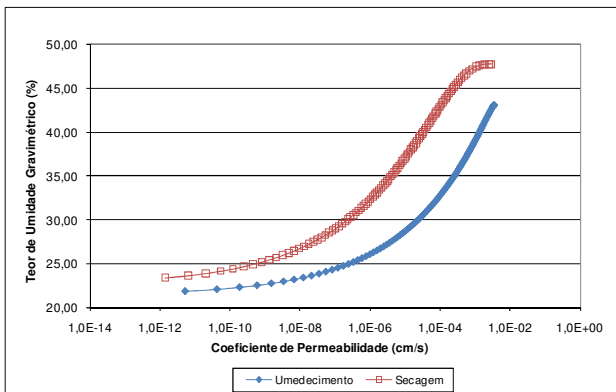


Figura 4: Variação do coeficiente de permeabilidade não saturado com o teor de umidade gravimétrico do solo, para as trajetórias de umedecimento e secagem, à profundidade de 2,5 m.

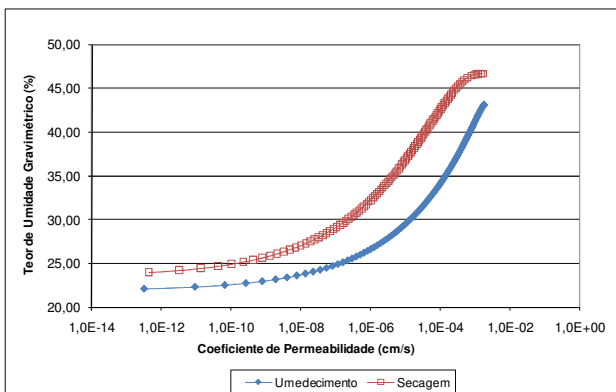


Figura 5: Variação do coeficiente de permeabilidade não saturado com o teor de umidade gravimétrico do solo, para as trajetórias de umedecimento e secagem, à profundidade de 3,5m.

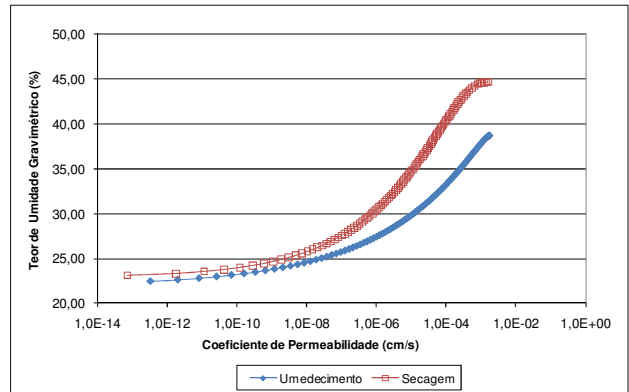


Figura 6: Variação do coeficiente de permeabilidade não saturado com o teor de umidade gravimétrico do solo, para as trajetórias de umedecimento e secagem, à profundidade de 4,5 m.

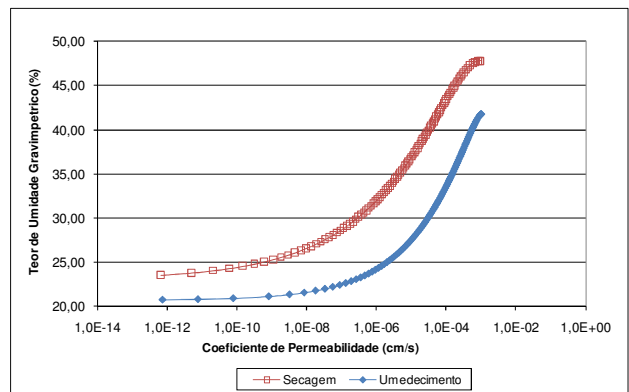


Figura 7: Variação do coeficiente de permeabilidade não saturado com o teor de umidade gravimétrico do solo, para as trajetórias de umedecimento e secagem, à profundidade de 5,5 m.

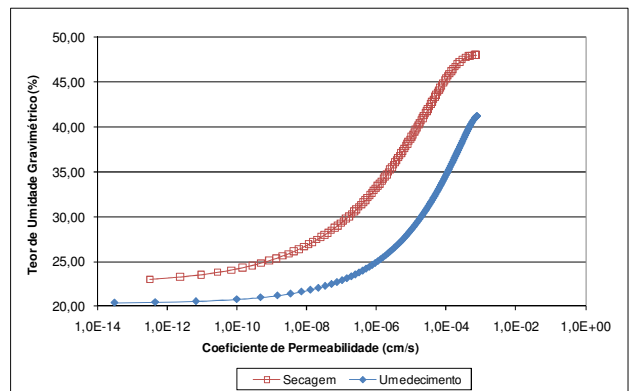


Figura 8: Variação do coeficiente de permeabilidade não saturado com o teor de umidade gravimétrico do solo, para as trajetórias de umedecimento e secagem, à profundidade de 6,5 m.

Nessa condição, onde o solo apresenta teor de umidade residual, os canais formados pelas interconexões dos vazios do solo não apresentam uma lâmina de água contínua e, portanto, não é possível que a água permeie por esses canais. À medida que se vai aumentando a umidade do solo, a água presente no interior dos poros vai formando

caminhos contínuos, onde o fluxo de água é possível. Enquanto o número de canais contínuos aumenta, aumenta também o coeficiente de permeabilidade do solo, e, quando todos eles já estão preenchidos com água, chega-se ao valor máximo de coeficiente de permeabilidade, correspondente ao coeficiente de permeabilidade saturado do solo.

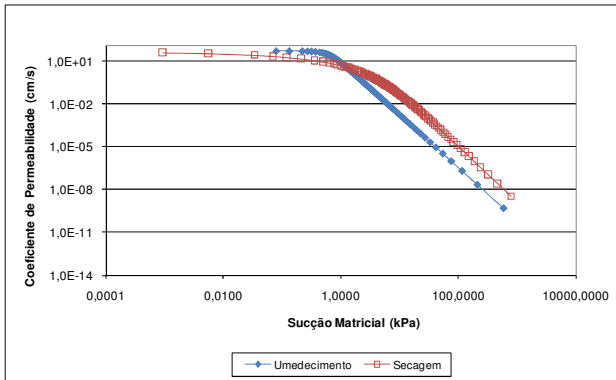


Figura 9: Variação do coeficiente de permeabilidade não saturado com a sucção matricial do solo, para as trajetórias de umedecimento e secagem, à profundidade de 1,5m.

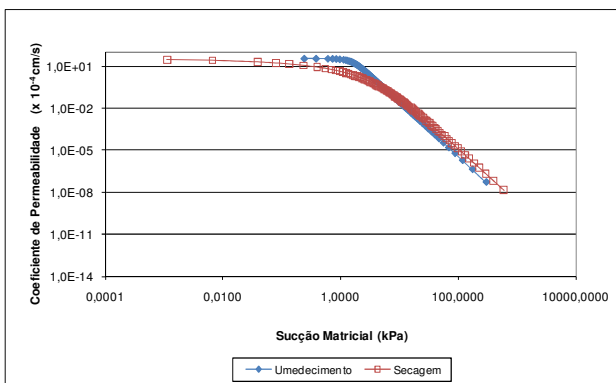


Figura 10: Variação do coeficiente de permeabilidade não saturado com a sucção matricial do solo, para as trajetórias de umedecimento e secagem, à profundidade de 2,5m.

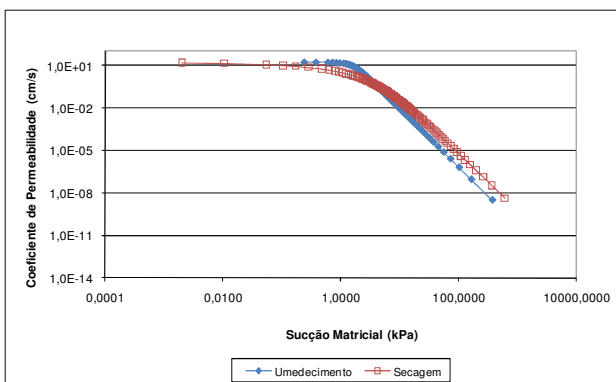


Figura 11: Variação do coeficiente de permeabilidade não saturado com a sucção matricial do solo, para as trajetórias de umedecimento e secagem, à profundidade de 3,5 m.

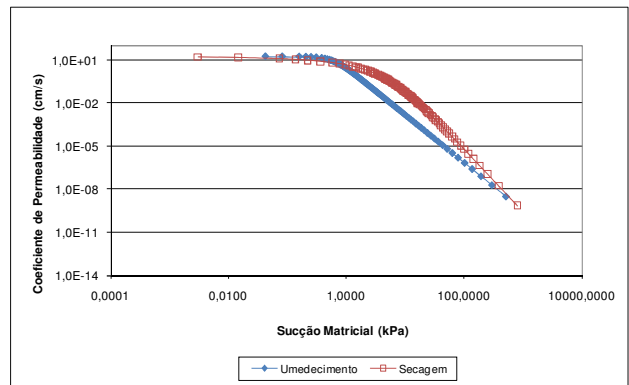


Figura 12: Variação do coeficiente de permeabilidade não saturado com a sucção matricial do solo, para as trajetórias de umedecimento e secagem, à profundidade de 4,5m.

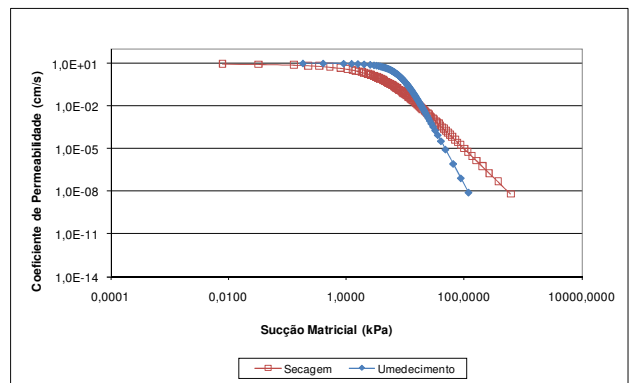


Figura 13: Variação do coeficiente de permeabilidade não saturado com a sucção matricial do solo, para as trajetórias de umedecimento e secagem, à profundidade de 5,5m.

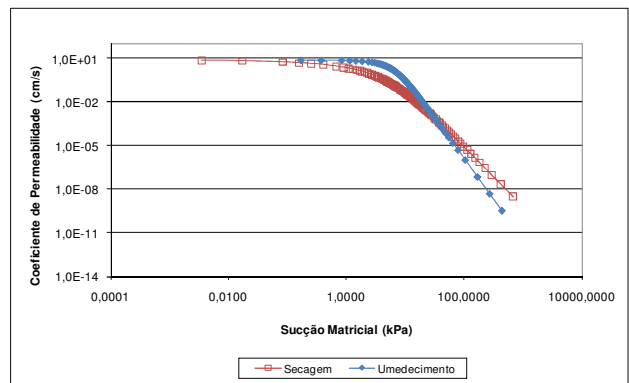


Figura 14: Variação do coeficiente de permeabilidade não saturado com a sucção matricial do solo, para as trajetórias de umedecimento e secagem, à profundidade de 6,5m.

Segundo a equação de Poiseuille para fluxos laminares em tubos capilares, o fluxo de água é diretamente proporcional ao quadrado do raio do tubo. Sabe-se também que k é diretamente proporcional à quantidade de fluxo de água. Verificando-se as curvas de umedecimento das Figuras 3 a 8, percebe-se que, entre o valor de teor de umidade residual e certo valor de teor de

umidade (aproximadamente 35%), o coeficiente de permeabilidade é bastante baixo, indicando que o fluxo se dá apenas através dos micro-poros, que são os primeiros a serem preenchidos com água. A partir desse teor de umidade, pequenos acréscimos no valor de w acarretam grandes acréscimos nos valores de k , mostrando que nesse intervalo os macro-poros começam a serem preenchidos, permitindo o fluxo de água por esses caminhos. Nas trajetórias de secagem ocorre o contrário: os macro-poros são os primeiros a perderem água. Dessa forma, pequenos decréscimos de w a partir da umidade de saturação acarretam grandes decréscimos de k , indicando que o fluxo através dos macro-poros, que é mais intenso, é interrompido.

Nota-se, nas Figuras 3 a 14 apresentadas, a influência bastante presente da *histerese* na função permeabilidade do solo. Quando o solo foi umedecido, os valores da função permeabilidade obtidos foram diferentes dos alcançados quando o solo foi seco.

Ao se analisar as Figuras 9 a 14, pode-se verificar que o valor da sucção matricial influencia substancialmente o coeficiente de permeabilidade não saturado do solo. À medida que o valor da sucção aumenta, há uma diminuição no valor de k , e esse coeficiente aproxima-se de zero quando se impõem valores relativamente altos de sucção matricial. Para valores de sucção nulos, o coeficiente k se aproxima de k_{sat} . Nota-se também que a taxa de diminuição de k com o aumento da sucção é maior para as trajetórias de umedecimento. Isso ocorre porque, no umedecimento, a água expulsa o ar dos vazios do solo, enquanto que na secagem, o ar é quem expulsa a água dos vazios. É evidente que o primeiro processo é mais fácil, conforme pode ser analisado nas Figuras 1 e 2, onde a taxa de variação da sucção matricial com o teor de umidade é maior para a trajetória de umedecimento que para a trajetória de secagem.

As Figuras 15 e 16 apresentam as curvas coeficiente de permeabilidade (k) versus teor de umidade gravimétrico (w), para as trajetórias de umedecimento e secagem, respectivamente.

Nota-se que os valores dos coeficientes de permeabilidade máximos, que correspondem ao valor de k_{sat} , para as amostras apresentadas, diminuem com a profundidade.

Isso reflete o grau de laterização sofrido pelo solo, pois camadas de solo mais superficiais sofrem mais intensamente os processos de laterização, principalmente a lixiviação. Dessa forma, apresentam valor de índices de vazios mais elevados e a probabilidade de ocorrência de pares seqüenciais de poros é maior. A função permeabilidade de um solo, segundo Cardoso Junior (2006) e Silva (2005), é proporcional a essa probabilidade.

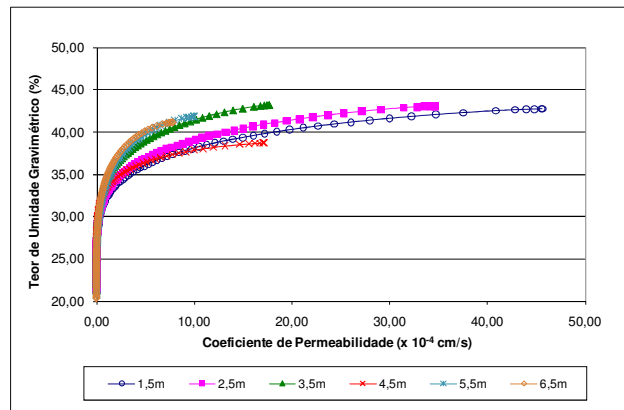


Figura 15: Coeficiente de permeabilidade (k) versus teor de umidade gravimétrico (w), para a trajetória de umedecimento, nas profundidades estudadas.

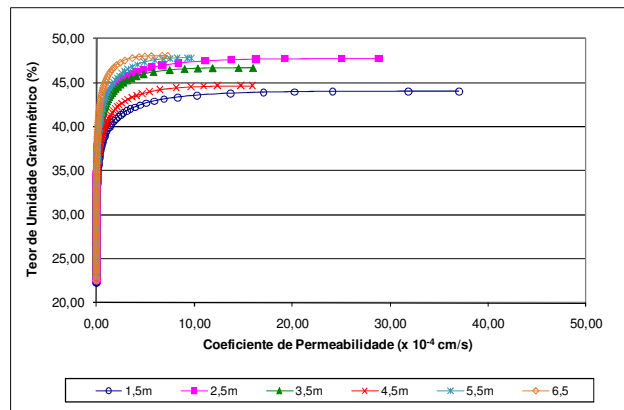


Figura 16: Coeficiente de permeabilidade (k) versus teor de umidade gravimétrico (w), para a trajetória de secagem, nas profundidades estudadas.

As Figuras 17, 18 e 19 apresentam fotografias de lâminas confeccionadas com solo natural para as profundidades de 1,5m, 4,5m e 6,5m, respectivamente, analisadas segundo a técnica da microscopia óptica, apresentadas por Miguel et al. (2007c).

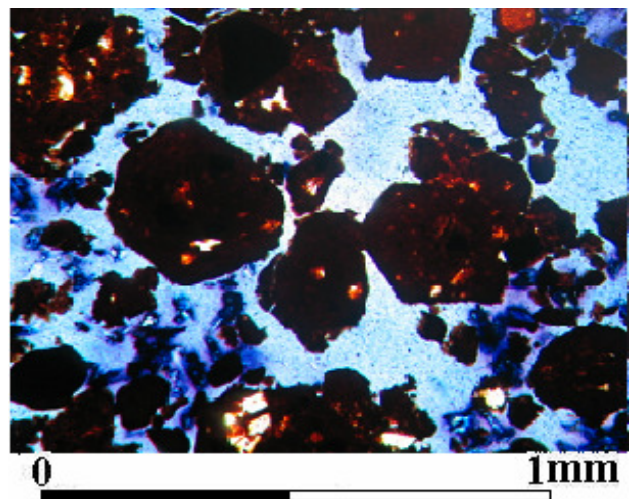


Figura 17: Fotografia, por microscopia óptica, de uma lâmina de solo natural, retirada da profundidade de 1,5m.

Percebe-se claramente, da análise das Figuras 17 a 19, a maior porosidade do solo mais superficial. Além disso, verifica-se uma maior presença de micro-poros no solo mais profundo, enquanto que no mais superficial, prevalecem os macro-poros.

As Figuras 20 e 21 apresentam as curvas coeficiente de permeabilidade (k) versus a sucção matricial, para as trajetórias de umedecimento e secagem, respectivamente.

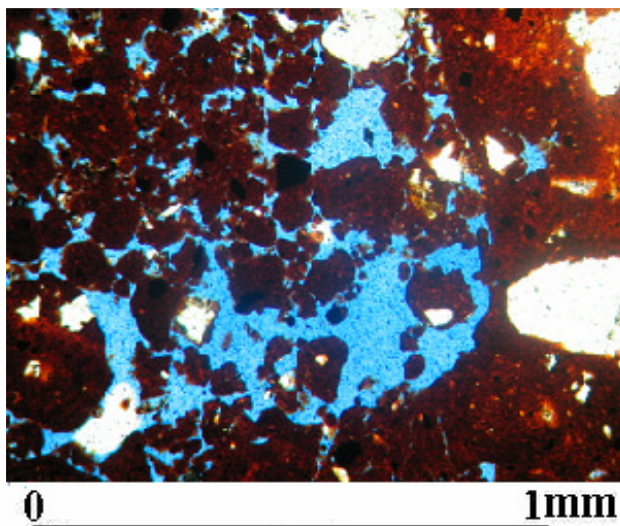


Figura 18: Fotografia, por microscopia óptica, de uma lâmina de solo natural, retirada da profundidade de 4,5m.

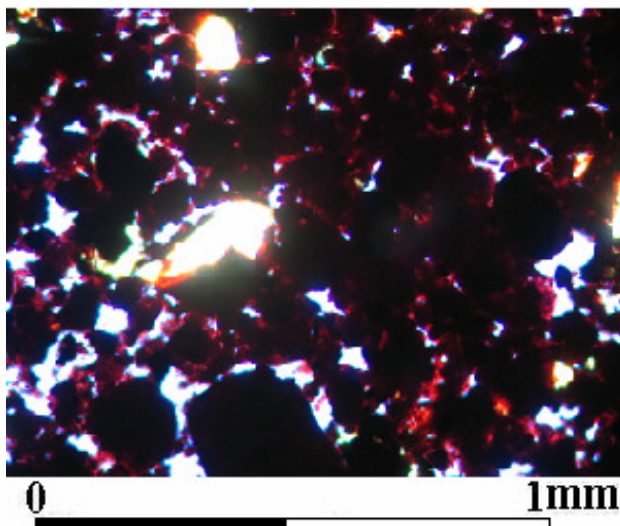


Figura 19: Fotografia, por microscopia óptica, de uma lâmina de solo natural, retirada da profundidade de 6,5m.

Da análise das Figuras 20 e 21, pode-se notar mais uma vez que o valor de k_{sat} (máximo valor de k) diminui com a profundidade. Verifica-se também que, no processo de secagem, a taxa de variação do coeficiente de permeabilidade não saturado é menor que no processo de umedecimento, mais uma vez evidenciando que o umedecimento, que ocorre pela

expulsão do ar dos vazios do solo pela água, é mais facilitado em relação à secagem, onde ocorre o contrário.

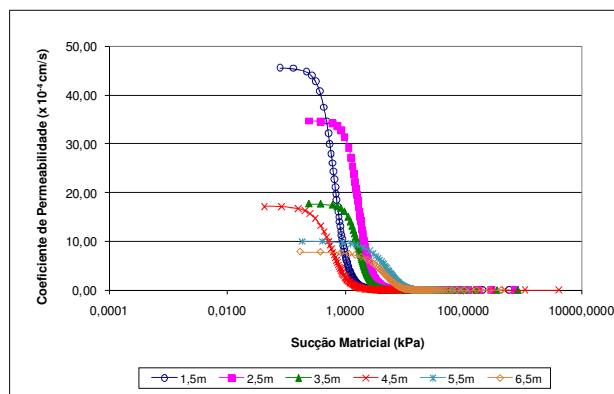


Figura 20: Coeficiente de permeabilidade (k) versus sucção matricial, para a trajetória de umedecimento, nas profundidades estudadas.

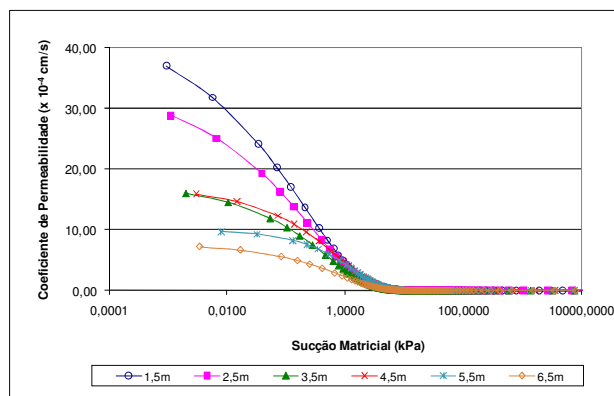


Figura 21: Coeficiente de permeabilidade (k) versus sucção, para a trajetória de secagem, nas profundidades estudadas.

Verifica-se também que, conforme se aumenta a profundidade, diminui-se a taxa de variação do coeficiente de permeabilidade k com a sucção, tanto na trajetória de umedecimento como na de secagem. Esse fato pode ser explicado embasando-se na análise das Figuras 17 a 19. À medida que se avança em profundidade, o tamanho dos poros vai diminuindo. Evidentemente, devido à tensão superficial da água, em canais mais finos (formado por poros menores) é mais difícil da água expulsar o ar dos vazios e também do ar expulsar a água dos vazios. Outro fato que merece atenção, quando se analisam as Figuras 20 e 21, é que, apesar da taxa de variação de k para a profundidade 1,5m ser maior que essa taxa para a profundidade de 6,5m, é mais difícil de atingir k_{sat} na amostra mais superficial. Isso porque o valor de k_{sat} é maior para 1,5m, influenciado pelo tamanho e quantidade de poros.

4. CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser destacadas do presente trabalho com relação à permeabilidade não saturada de um perfil de solo laterítico de 6,5m de espessura:

O coeficiente de permeabilidade não saturado do solo foi proporcional ao teor de umidade gravimétrico e inversamente proporcional à sucção matricial imposta;

O fenômeno da *histerese* também foi observado nas propriedades hidráulicas do solo;

Verificou-se a conformidade dos resultados obtidos com a equação de Poiseuille para fluxos laminares em tubos capilares;

A taxa de variação do coeficiente de permeabilidade (k) com a sucção matricial diminuiu com a profundidade do perfil de solo, evidenciando a influência do tamanho e quantidade dos poros nas suas propriedades hidráulicas.

A taxa de variação do coeficiente de permeabilidade não saturado nas trajetórias de secagem foi menor que nas de umedecimento, evidenciando que o processo de umedecimento ocorre de maneira mais fácil em relação ao processo de secagem.

5. AGRADECIMENTO

Os autores gostariam de expressar seus sinceros agradecimentos à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelos auxílios às pesquisas 2005/00164-7 e 2008/00016-6 e pela bolsa de mestrado 2008/02162-0.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas (procedimentos). NBR 9604/1986.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - Amostras de Solos - Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. NBR 6457/1986.

Albuquerque, P. J. R.; Massad, F.; Carvalho, D. de E Ferreira, M. A. M.. Comportamento à compressão de estacas escavadas, hélice contínua e hélice tipo Ômega, em solo residual de diabásio. Campinas/SP: UNICAMP, 2001. 198p.

Bonder, B. H. Curvas de Retenção de Água de um Solo Coluvionar de Campinas Obtidas Mediante Técnicas de Laboratório e Campo. Dissertação de Mestrado. FEC/UNICAMP, Campinas. 2008.

Cardoso Junior, C. R. Estudo do comportamento de um solo residual de gnaiss não saturado para avaliar a influência da infiltração na estabilidade de taludes. Dissertação (Mestrado). Escola

Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. 158p.

Cordão Neto, M. P., Farias, M. M., Rocha, D. O. Modelagem Constitutiva da Permeabilidade para Solos Colapsíveis. In: VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. N-SAT/2007. Salvador/BA, 2007. CDRom.

Fredlund, D.G. & Rahardjo, H. Soil mechanics for unsaturated soils. New York, John Wiley & Sons, 1993. 517p.

Hurtado, A. L. B. Variabilidade da Condutividade Hidráulica do Solo em Valores Fixos de Umidade e de Potencial Matricial. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura – “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004. 119p.

Miguel, M. G.; Albuquerque, P. J. R. de; Benatti, J. C. B.; Marque, R. E Carvalho, D. de. Estudo da Condutividade Hidráulica do Solo Laterítico de Campinas/SP. In: XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. COBRAMSEG'2006. Curitiba/PR. Vol.1, p.261-266. 2006.

Miguel, M. G., Albuquerque, P. J. R., Azevedo, G. S., Silva, G. S. V., Carvalho, D. de Lateritic Behaviour of the Colluvial Soil from Campinas-SP-Brazil In: XIII Pan American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Isla de Margarita, 2007a. v.1. CDRom.

Miguel, M. G., Albuquerque, P. J. R., Saueia, F. N., Benatti, J. C. B., Marque, R., Hajnal, V. H. J. Aspectos Geológico-Geotécnicos da Camada de Solo Argiloso, Laterítico e Coluvionar de Campinas/SP In: III Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos do Centro-Oeste e Norte. Cuiabá/MT: CEFET/MT, 2007b. v.1. CDRom.

Miguel, M. G., Albuquerque, P. J. R., Marque, R. Carvalho, D. de. Análise de Comportamento Colapsível de uma Argila Laterítica de Origem Coluvionar. In: XVI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Salvador/BA. VI NSAT2007. Novembro de 2007c. p.69-77.

Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12:5 13-522.

Richards, L. A. The usefulness of capillary potential to soil moisture and plant investigators. *Journal of Agricultural Research*, v.37, p.719-742, 1928.

Rodriguez, T. G., Miguel, M. G., Marque, R., Albuquerque, P. J. de Resistência ao Cisalhamento de um Solo Coluvionar e Laterítico de Campinas/SP. In: VI Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura. ENTECA/2007. Maringá/PR. UEM. 2007. CDRom.

Silva, A. M. Banco de Dados de Curvas de Retenção de Água de Solos Brasileiros. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. 136p.

Van Genuchten, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.44, p.892-898, 1980.

Van Genuchten, M. Th.; Leij F. J.; Yates S. R.. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. *EPA/600/2-91/065*. 93 pp.