

Coeficiente de permeabilidade para fluídos em meio saturado (K_s): estimativa através de colunas de fluxo e potencial matricial variável

Coefficient of permeability for fluid in saturated means (K_s): estimate by flow columns and variable matrix potential

Ademir da Silva Santos^{1(*)}

Sérgio Fred Ribeiro Andrade²

Fermin Garcia Velasco³

Francisco Heriberto Martínez Luzardo⁴

Resumo

O coeficiente de permeabilidade (K_s) é um parâmetro de grande relevância nos processos de modelagem do risco ambiental, sua mensuração visa subsidiar estudos da contaminação de solos e águas subterrâneas. Possui como função a caracterização dos limites de condução em meio saturado de solutos contaminantes em texturas diversas de solo, permitindo a análise do maior ou menor grau de percolação na matriz do solo. Salienta-se que para cada textura de solo existem faixas de K_s distintas, para solos arenosos os valores podem chegar a 10^2 cm/dia e para solos argilosos estes valores não passam de 10^{-1} cm/dia. Os métodos empregados para medição da K_s são variados e na maioria dispendiosos. Podem ser observadas em diversos trabalhos científicos, técnicas de medição em campo e em laboratório, em ambos os casos aplicam-se aparelhos denominados permeômetros, além disso, existem também técnicas de mensuração da K_s indiretos, aplicando equações

-
- 1 MSc.; Bacharel em Administração; Doutorando em Desenvolvimento e Meio Ambiente pela Universidade Estadual de Santa Cruz, UESC, BA; Servidor Técnico Administrativo em Educação no Instituto Federal da Bahia, *Campus* Porto Seguro; Endereço: Rodovia Jorge Amado, km 16, Bairro Salobrinho, CEP: 45662-900, Ilhéus, Bahia, Brasil; E-mail: adm_santos@yahoo.com.br (*) Autor para correspondência.
 - 2 MSc.; Sistemas de Informação; Doutorando em Ciências Ambientais na Universidade Estadual de Santa Cruz, UESC; Professor Assistente do Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas da UESC; Rodovia Jorge Amado, km 16, Bairro Salobrinho, CEP 45662-900, Ilhéus, Bahia, Brasil; E-mail: sergio.fred@hotmail.com
 - 3 Dr.; Físico; Doutor em Física Atômica pelo Centro de Estudos Aplicados Al Desarrollo Nuclear, CEADEN, Cuba, Diretor do Centro de Pesquisa em Ciências e Tecnologias das Radiações, CPQ/CTR, Professor do Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual de Santa Cruz, UESC, *Campus* Soane Nazaré de Andrade; Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq; Endereço: Rodovia Jorge Amado, km 16, Bairro Salobrinho, CEP 45662-900, Ilhéus, Bahia, Brasil; E-mail: fermingv@gmail.com; E-mail: fermingv@gmail.com
 - 4 Dr.; Químico; Doutor em Ciências Técnicas, Centro Nacional de Pesquisas Científicas de Cuba, Professor do Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual de Santa Cruz, UESC, *Campus* Soane Nazaré de Andrade; Endereço: Rodovia Jorge Amado, km 16, Bairro Salobrinho, CEP 45662-900, Ilhéus, Bahia, Brasil; E-mail: fmartinezluzardo@gmail.com; E-mail: fmartinezluzardo@gmail.com

Recebido para publicação em 02/02/2015 e aceito em 06/11/2015

Ambiência Guarapuava (PR) v.12 n.2 p. 599 - 613 Maio/Ago. 2016 ISSN 2145 - 9405
DOI:10.5935/ambiencia.2016.02.06

teóricas que utilizam parâmetros de entrada físico-químicos, como os limites de umidade do solo. Dessa forma, devido às inúmeras técnicas utilizadas, existem valores de K_s distintos para o mesmo tipo de solo, sendo mais adequado apresentar o K_s como faixas entre valores máximos e mínimos. O objetivo do trabalho, portanto, foi criar uma técnica de estimação do K_s integrando dois métodos de fácil aplicação e custo reduzido, que levasse em conta os padrões transientes de carga e vazão de saída de fluidos orgânicos distintos e água em um solo arenoso.

Palavras chave: coeficiente de permeabilidade (K_s); textura do solo; métodos de medição de K_s ; de fluxo variável e potencial matricial.

Abstract

The coefficient of permeability (K_s) is a very important parameter in the environmental risk modeling processes and its measurement is aimed at subsidizing the contamination of soil and groundwater studies. It has the function of characterizing the driving limits amid saturated solute contaminants in various soil textures, allowing analysis of a greater or lesser degree of percolation of the soil matrix. It is noted that for each soil texture, there are distinct K_s bands, for sandy soils the values can reach 10^2 cm/day and for clay soils these values are only 10^{-1} cm/day. The methods used for measuring the K_s are varied and costly. It can be observed that in many scientific studies, techniques for field and laboratory measurement are used, and in both cases the devices used are called permeameters. In addition, there are also indirect measurement techniques of K_s , applying theoretical equations using physicochemical input parameters such as soil moisture limits. Thus, due to the many techniques used, there are different K_s values for the same type of soil, given that the coefficient K_s is the most adequate for bands ranging between maximum and minimum values. Therefore, the objective of this study was to create a K_s estimation technique, integrating two methods of easy application and low cost, that could take into account the load transient patterns and distinct output flow of organic fluids and water in a sandy soil.

Key words: coefficient permeability (K_s); soil texture; measurement methods of K_s ; variable flow and matric potential.

Introdução

Nos processos de modelagem computacional para estimação de concentrações de solutos poluentes no solo, um dos parâmetros mais relevantes é a permeabilidade (K_s), utilizada em diversos modelos hidráulicos como os de Brooks e

Corey (1964), Durner (1994), Kosugi (1996) e Van Genuchten (1980). Estes modelos utilizam algumas propriedades específicas do solo para descrever numericamente o processo de infiltração, advecção e dispersão de solutos em solos com texturas diversas. As principais propriedades físicas de entrada utilizadas nas

equações dos modelos citados são: umidade residual e saturada, densidade de campo e permeabilidade. A densidade de campo (bulk density *BD*) é um parâmetro físico obtido através de experimentos aplicados em campo com anel volumétrico. O parâmetro estabelece a relação entre a massa do solo seco por seu volume (g/cm^3), no cálculo são considerados os poros e a matéria orgânica presentes. O solo aplicado neste estudo possui uma densidade de campo de $1,52 \text{ g}/\text{cm}^3$, geralmente encontrada em solos arenosos (MOREIRA, 1997; MOREIRA, 2005).

Em muitos códigos computacionais, o Hydrus 1D, essas propriedades são definidas através das funções de pedotransferência (*PTF's*), as quais são rotinas estatísticas de regressão que utilizam como base de dados informações sobre a textura granulométrica de solos específicos (SIMUNEK et al., 2008). O maior conflito em relação à determinação dos parâmetros físicos do solo se refere aos métodos aplicados. Os modeladores preferem as diversas *PTF's* inclusas nos códigos computacionais, já os pedologistas preocupam-se com o caráter empírico do processo de estimação. Em muitos casos, os códigos computacionais utilizam banco de dados com estudos empíricos específicos, contendo informações das principais variáveis físicas do solo, agrupadas pelo tipo de textura (arenoso, argiloso, siltoso). No estudo realizado por Budiman et al. (2003) as *PTF's* são funções quantitativas dinâmicas, que possuem um mecanismo preditivo capaz de estimar propriedades relevantes do solo a partir de dados básicos, como a estrutura granulométrica, contribuindo para montagem de cenários e simulações, como nos processos de contaminação do solo. No Brasil, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA tem desenvolvido um banco

de dados próprio com diversas propriedades físicas de solos nacionais, porém, a base de dados ainda é fechada, com acesso exclusivo de pesquisadores.

Considerando as dificuldades técnicas e de custo na obtenção dos parâmetros físicos e hidráulicos do solo por ensaios laboratoriais, assim como pela ausência de banco de dados com informações aptas para estimar as propriedades dos solos do Brasil, objetivou-se o desenvolvimento de uma bancada para colunas de PVC de fácil construção e custo reduzido, sendo capaz de medir o parâmetro por duas metodologias distintas e cientificamente relevantes.

Material e Métodos

Os métodos utilizados para determinação da constante de permeabilidade podem ser diretos e indiretos. Nos métodos indiretos são utilizadas equações matemáticas para estimação da K_s , utilizando outros parâmetros como entrada (por exemplo o teor de umidade). Os métodos diretos podem ser divididos em técnicas de campo ou laboratório, no entanto, para todos os métodos é necessário o conhecimento das informações relativas ao potencial matricial e do fluxo para cada tipo de solo (JURY et al., 2004). O Hydrus 1D utiliza a equação (1) modificada de Darcy-Buckingham, que estabelece o coeficiente de permeabilidade (K_s), como dependente dos padrões texturais do solo (potencial matricial) e outros fatores como teor de umidade e adensamento:

$$q = -K_s \frac{\partial h}{\partial z} + K_s \quad (1)$$

Onde, q é a vazão do fluxo de água, K_s é a permeabilidade (cm/dia), valor fixo

e constante por tipo de solo, h é a carga hidráulica dissipada (pressão) e z é a área do solo tomada como parâmetro. A equação apresentada acima permite a definição de valores como a velocidade de percolação da água em fluxos variados conforme as características de textura do solo.

Na equação de Van Genuchten (1980), os parâmetros, permeabilidade e teor de umidade do solo são essenciais na simulação do transporte da água e solutos em um perfil de solo. As diversas texturas de solo possuem faixas bem definidas de K_s , solos arenosos podem variar entre 10^0 a 10^2 cm/h (RAWLS et al., 1982; VAN GENUTCHEN, 1980).

Os ensaios de permeabilidade de fluidos, normalmente são realizados através de três métodos distintos: o método do permeâmetro de carga constante (PCC), o método do fluxo de água transiente, por meio do permeâmetro de carga variável (PCV) e o método da carga hidráulica variável por meio de colunas de PVC em bancada. Também são utilizadas funções de pedotransferência para estimação da K_s , como o método SSCBD do Hydrus 1D (SHUKLA, 2013). Neste método, os parâmetros de entrada relacionados à estrutura granulométrica e textural do solo são utilizados para auferir outros resultados, como o teor de umidade. Neste trabalho, optou-se pela construção de uma bancada específica para colunas de PVC, que permitisse a mensuração da K_s pelo método de fluxo variável, contido nas orientações do manual da EMBRAPA (1997) e pelo método de carga variável estabelecido no trabalho de Klute e Dirksen (1986).

O PCC é um equipamento de alto custo que mede o fluxo de determinado líquido após um tempo determinado de infiltração, o ensaio é uma relação que envolve volume do fluido, altura e largura da coluna utilizada, tempo de percolação, temperatura da solução, perda de

carga, todos esses fatores são calculados a partir de um solo previamente saturado. O método do fluxo transiente mede a K_s por meio da variação do fluxo de saída do soluto de determinada coluna em um tempo específico de equilíbrio. O método da carga variável pode também ser chamado de método de decaimento, pois se baseia na variação da altura de determinado volume de soluto inserido na coluna em um tempo de equilíbrio específico. Dentre as equações utilizadas na bancada desenvolvida, as equações 3 e 4 foram utilizadas, pois podem ser adaptadas a equipamentos e estruturas de medição diversas, o que não ocorre na equação 2, aplicada especificamente para o equipamento PCC:

Equação de estimação da K_s por PCC (NBR Nº 13292/95).

$$K = \frac{V \times L \times R_T}{h \times A \times t} \quad (2)$$

Onde, K é o coeficiente de permeabilidade, V é o volume do fluido utilizado percolado na coluna (cm^3), L é a altura da coluna (corpo de prova), R_T é um fator de correção do equipamento (0,89), h é a diferença da perda de carga (cm), A é a área da seção transversão da coluna (cm^2) e t é o tempo de medição (s, hr ou dia).

Equação de estimação da K_s por fluxo transiente (EMBRAPA, 1997).

$$K = \frac{Q \times L}{A \times H \times t} \quad (3)$$

Onde, L é a altura do solo saturado, Q é a vazão após o tempo de queda, A é área da seção transversal da coluna, H é a altura

da coluna e t o tempo de queda da água (min/1440 = dia).

Equação de estimação da K_s por carga hidráulica variável (KLUTE e DIRKSEN, 1986).

$$K_s = \frac{L}{t_1} \ln \frac{b_0 + L}{b_1 + L} \quad (4)$$

Onde, L é a altura do solo saturado, b_0 é a carga inicial do fluido, b_1 é a carga final do fluido, t_1 é o tempo de medição final após a queda do fluido (60min/1440 = dia) e $\ln = \log$ natural ($\ln = \log_e x$)

Apesar da possibilidade de realização dos ensaios de permeabilidade saturada por dois métodos distintos, os ensaios realizados na bancada desenvolvida pelo Centro de Tecnologia das Radiações - CTR/UESC considerou que o método mais adequado, com medições mais precisas e consequentemente de menor incerteza, foi o de Klute e Dirksen (1986). No entanto a sua estruturação permitiu a medição da permeabilidade por ambos os métodos citados. Segue na figura 1, a bancada do CTR/UESC com o esquema de montagem das colunas de PVC.

Foram montadas na bancada de apoio (Figura 1) 8 colunas de PVC (rígido) com 60 cm altura (L), e um diâmetro de 100 mm, tendo uma área interna transversal de 78,54 cm². Montou-se 4 colunas para amostras de solos compostos e saturados para a profundidade de 30 cm e mais 4 colunas para solos de profundidade de 150 cm. O preenchimento com solo foi realizado até a altura máxima de 50 cm (solo não saturado) (b), deixando um espaço vazio superior para inserção da água de 10 cm (a). Na saída da coluna, foi fixado com fita adesiva um tecido (tipo MORIM) para retenção do solo (c), porém, que permitisse

Figura 1 –Experimento montado no Laboratório de Solos do CTR/UESC em 2013



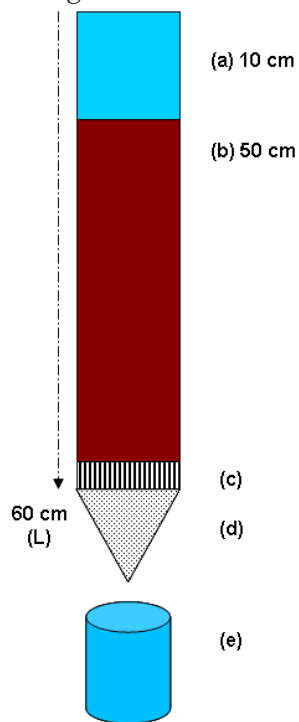
Fonte: Santos, A. S. et al. (2015)..

a livre drenagem do fluido de água. Logo após, apoiado no orifício de suporte da coluna e fixo sobre o tecido, foi instalado um funil para escoamento do fluxo de água (d). Por fim, embaixo da bancada foram alocados reservatórios para coleta e medição da vazão (e) com 600 ml de capacidade.

Os ensaios realizados para estimação do K_s também permitiram a determinação de outros parâmetros físicos e hidráulicos do solo que auxiliaram no entendimento do processo de infiltração e fluxo da água no solo. Além da permeabilidade (cm/dia), foi possível calcular o poder de compactação do solo (%), a vazão de água (ml/h), a retenção máxima de água (%) e a retenção mínima de água (%).

É preciso destacar que alguns procedimentos foram realizados previamente, estes procedimentos visaram à preparação e

Figura 2 – Esquema de montagem das colunas de PVC para percolação de água e solutos



Fonte: Santos, A. S. et al. (2015).

saturação das colunas de PVC. Como se trata de permeabilidade saturada, as colunas de solo foram previamente saturadas com água, obedecendo às seguintes etapas:

Preenchimento da coluna com solo previamente saturado com água até 50 cm de altura;

Preenchimento do espaço vazio da coluna, acima da amostra de solo, com água de forma suave e devagar;

O volume inicial de água foi percolado através da coluna até que não ocorresse mais o fluxo do soluto na saída da coluna;

Verificação do volume inicial utilizado, volume de saída e tempo de saturação.

Após esse processo, os ensaios foram propriamente realizados, com medições no mínimo em três repetições por coluna,

sendo elaboradas, em tempos de 60 min., os parâmetros médios foram obtidos como os resultados finais. Outra forma de estimação também foi utilizada, sendo medido o decaimento da carga superior do fluido na coluna a cada 15 min. até a não ocorrência de fluxo na saída da coluna.

A bancada também foi utilizada para a verificação do processo de decaimento e permeabilidade para os combustíveis puros, diesel comum, gasolina comum e óleo de motor usado. A montagem das colunas seguiu o mesmo procedimento realizado na medição da permeabilidade para a água pura. Desta forma, foram montadas três colunas de PVC com solo até 50 cm, cada coluna para um fluido específico. As amostras de areia utilizadas nas colunas foram de uma profundidade de até 30 cm, pois a simulação realizada relaciona-se a um cenário preditivo de derrame superficial dos derivados de petróleo. A coluna foi previamente saturada com água com um tempo médio de percolação de 60 min. Após o tempo de saturação das colunas, aproximadamente 1,5 litro de cada componente foi derramado em sua respectiva coluna. As medições realizadas foram do decaimento da carga do fluido a cada quinze minutos mensurando também a vazão correspondente do efluente na coluna.

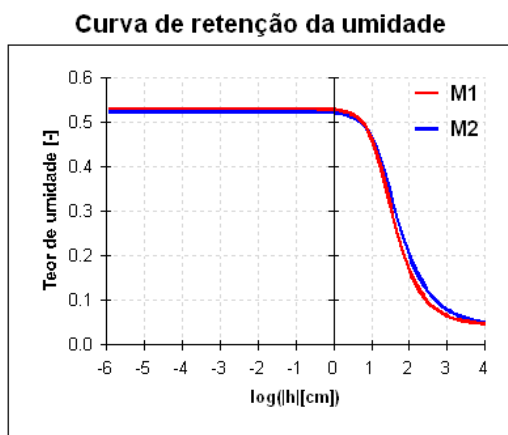
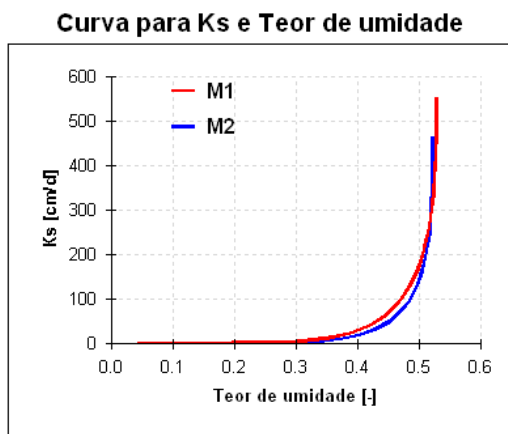
O objetivo dos ensaios realizados com o Diesel, a Gasolina e o Óleo de Motor, foi verificar a infiltração destes fluidos em solo saturado, considerando apenas o processo de dispersão mecânica, sem a interferência de determinado fluxo de água (precipitação). Os ensaios podem ser utilizados para demonstrar o processo de contaminação e o quanto as condições atmosféricas podem ou não influenciar no deslocamento dos combustíveis. Os principais dados medidos no ensaio foram o tempo de decaimento

da carga de cada fluido, a permeabilidade média, o volume do efluente, separando água e o composto (utilizando um funil de decantação), o tempo de saída do fluxo efluente e o percentual de retenção do composto nas colunas.

Resultados e Discussões

Os resultados demonstram faixas do coeficiente de permeabilidade saturada

Figura 3 – Teor de umidade e K_s simuladas a partir da textura granulométrica (SSDBD), com M1 (30 cm) e M2 (150 cm)

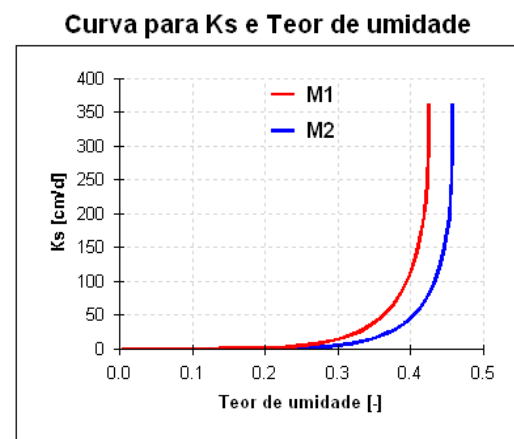
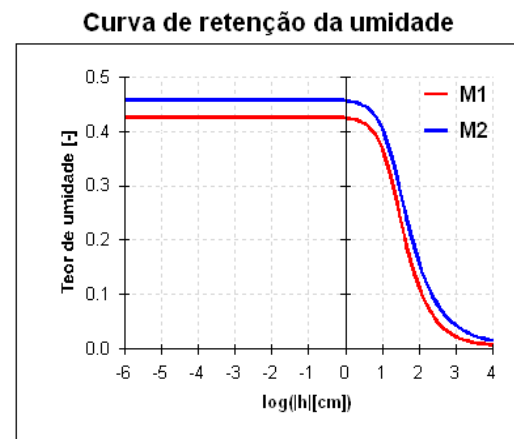


Fonte: Santos, A. S. et al. (2015).

dentro dos limites estabelecidos para solos de textura arenosa, com validações realizadas por estudos empíricos e aproximações com as faixas usualmente utilizadas na modelagem Hydrus 1D. O teor de umidade e a permeabilidade são apresentados nas figuras 3, 4 e 5, respectivamente relacionadas às simulações do Hydrus 1D, aos ensaios da COPPE/UFRJ e do CTR/UESC:

Na figura 3, percebe-se que a curva característica para solos arenosos possui rápido

Figura 4 – Teor de umidade e K_s medidos no Lab. de Caracterização de Solos COPPE/UFRJ, com M1 (30 cm) e M2 (150 cm)

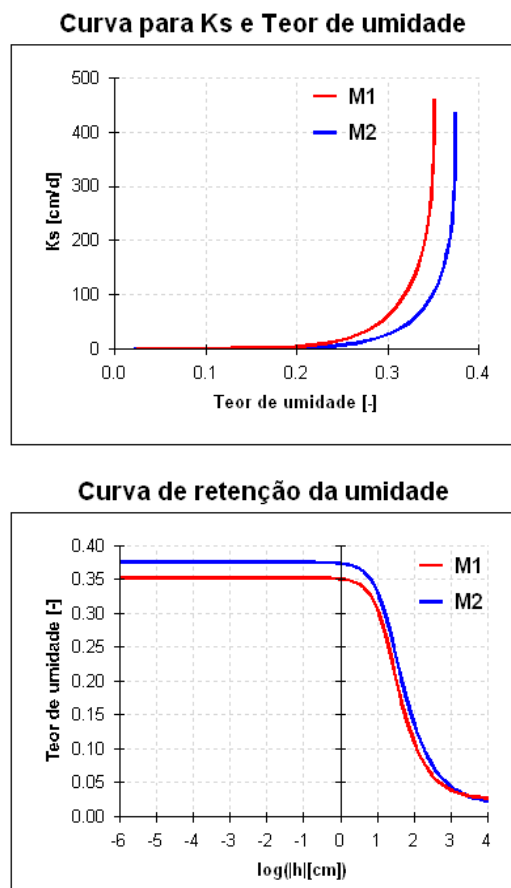


Fonte: Santos, A. S. et al. (2015).

declínio do teor de umidade, à medida que se reduz a carga hidráulica infiltrada no solo. É possível compreender também que a K_s está vinculada proporcionalmente ao teor de umidade do solo (coeficiente estimado pelo módulo Rosetta Lite do Hydrus 1D), elevando-se rapidamente quando alcança teores de 0,400 a 0,500 (cm^3/cm^3). Percebeu-se que os valores estão relativamente próximos e se encontram dentro do padrão de solos arenosos.

As figuras mostram uma pequena diferença nos valores do teor de umidade para as distintas profundidades, com a curva de

Figura 5 – Teor de umidade e K_s medidos no Lab. de Solos CTR/UESC, com M1 (30 cm) e M2 (150 cm)



Fonte: Santos, A. S. et al. (2015).

umidade maior para a profundidade de 150 cm, mais uma se confirma que ocorre uma rápida elevação da K_s a partir de um teor de umidade acima de 0,400 (cm^3/cm^3).

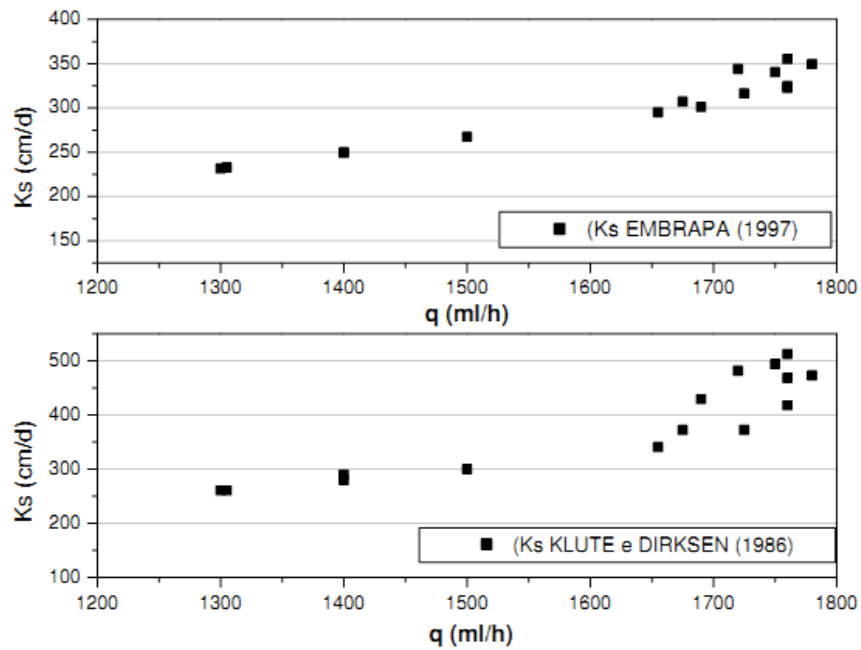
As informações de validação da K_s medidas na bancada estão relacionadas com as estimativas de permeabilidade por pedotransferência do Hydrus 1D e com as faixas estimadas de Rawls et al. (1982). As medições do K_s , para pontos específicos de profundidade no solo (30 cm e 150 cm) e por fim os resultados de K_s para os fluídos diesel, gasolina e óleo lubrificante, foram comparados, destacando as diferenças de decaimento dos fluídos.

Nas figuras 6 e 7 são apresentados os valores de permeabilidade (K_s), para cada procedimento de medição realizado, considerando as profundidades de coleta do solo em 30 cm (solo superficial) e 150 cm (solo subsuperficial). Os resultados mostram uma tendência de permeabilidade e fluxo de saída do efluente um pouco mais elevada para o solo superficial (30 cm), enquanto que para o solo subsuperficial (150 cm) os valores são menores, devido à maior homogeneidade textural do solo, o que confere maior compactação do solo. No solo superficial a maior presença de raízes e partículas com tamanhos distintos, cria uma maior quantidade de canais de fluxo, o que torna a permeabilidade média, mais elevada.

Estes resultados mostram que em casos de derrames acidentais de poluentes, como os combustíveis, haverá um decaimento mais lento no solo superficial (até 30 cm), com uma rápida dispersão subsuperficial (abaixo de 150 cm).

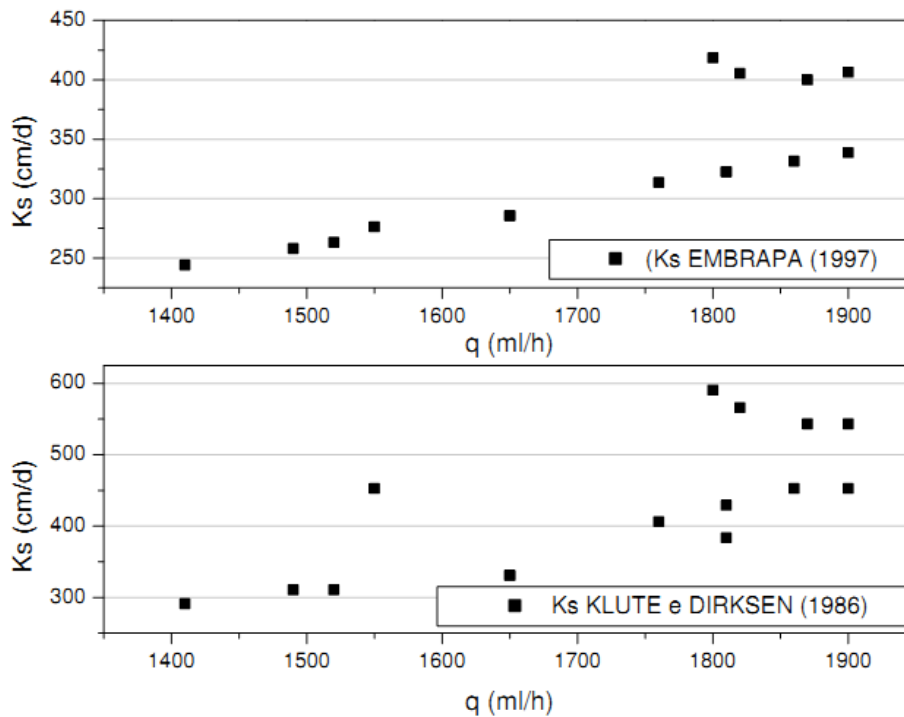
Os resultados médios para o solo superficial foram: permeabilidade (K_s) 458,51 cm/dia, compactação (%) 30,5, vazão de saída (q) ml/t (m/hr/d) 1761, retenção máxima (%)

Figura 6 - K_s para solo superficial (30 cm), com fluxo de saída (q) em ml/h



Fonte: Santos, A. S. et al. (2015).

Figura 7 - K_s para solo subsuperficial (150 cm), com fluxo de saída (q) em ml/h



Fonte: Santos, A. S. et al. (2015).

86, retenção mínima (%) 6,55, porosidade total (%) 35 e porosidade residual (%) 2,40. Para a profundidade de 150 cm os resultados obtidos para K_s 433,75 cm/dia, compactação (%) de 28, vazão (q) ml/t (m/hr/d) 1591 ml/hr, retenção máxima (%) 85,75, retenção mínima (%) 9,55, porosidade total (%) 37 e porosidade residual (%) 1,61. Na figura 8, os resultados de permeabilidade (cm/dia) (decaimento de carga inicial a cada 15 min.) da água foram comparados com os dados obtidos para o diesel, gasolina e óleo de motor usado. Pode-se observar na figura 8 um equilíbrio de permeabilidade da água no solo com o tempo. Em relação aos demais fluidos há uma pequena alteração dos valores de permeabilidade para as mesmas faixas de tempo. Assim, considerando os valores médios no tempo parcial de 450 minutos, a taxa de permeabilidade final para a água é um pouco maior do que o diesel e gasolina (231,50 cm/dia para gasolina, 19,74 cm/dia para óleo motor, 133,54 cm/dia para diesel e finalmente 278,20 cm/dia para água).

A gasolina possui uma permeabilidade no solo comparável com a água, ou seja, os derramamentos acidentais de gasolina no solo podem provocar uma rápida infiltração de contaminantes, afetando a qualidade do solo e da água subterrânea, chegando mais rapidamente aos pontos de exposição. Em decorrência do teor de etanol presente na gasolina nacional (25%) sua permeabilidade é maior no início da infiltração, sendo reduzida gradativamente com o tempo pela volatilização do etanol. Considerando que as colunas de solo foram previamente saturadas com água, e que a mesma possui uma polaridade elevada, geralmente contraria a polaridade do etanol, ocorre uma aceleração do processo de volatilização do etanol, decorrente da expulsão das moléculas pela

água, este fenômeno acaba gerando dutos de passagem para a gasolina no solo da coluna.

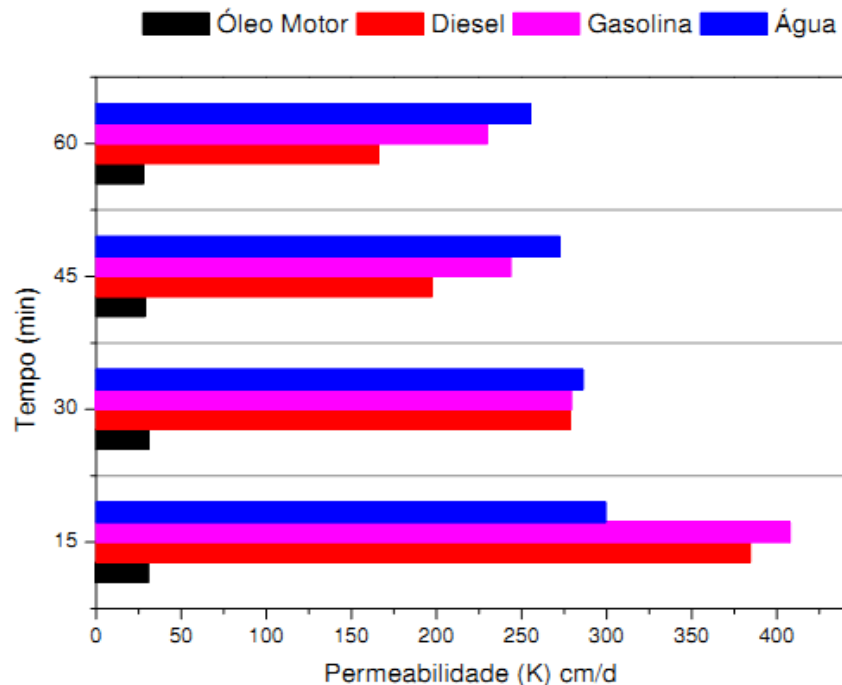
Em relação a diferença de densidade dos líquidos, a água possui densidade de 0,9991026 kg/l a 15 °C, enquanto que o etanol possui densidade de 0,775 kg/l a 15 °C. A densidade dos líquidos tem relação direta com a força de ligação das moléculas, no caso da água a ligação é mais forte, possui maior atração entre as moléculas, já o etanol possui ligação mais fraca entre as moléculas. Os dois principais parâmetros que fazem com que a permeabilidade da gasolina seja maior inicialmente estão relacionados a estes dois aspectos, a rápida volatilização e a densidade (força de ligação das moléculas).

Validação do método através da permeabilidade para água

Os parâmetros que podem ser obtidos, com base na textura granulométrica (ver Tabela 2), após as simulações do Hydrus 1D, são umidade saturada e residual e o coeficiente de permeabilidade. Os parâmetros utilizados para estimação da K_s no programa Rosetta Lite v. 1.1, modelo SSCBD (areia, silte, argila e densidade de campo), foram a textura granulométrica e a densidade de campo do solo de estudo (1,52 g/cm³).

Verifica-se que existe uma diferença nos valores de K_s , que são influenciados pela textura granulométrica e densidade global do solo. Na faixa de solo mais profunda a condutividade diminui, devido à presença de material argiloso, o que provoca maior retenção do fluxo de água. Esta redução também pode ser explicada pelo maior adensamento das partículas de solo. A densidade de campo do solo é de 1,52 g/cm³ conforme Moreira (2005).

Figura 8 – Permeabilidade de fluídos contaminantes e da água (tempo de decaimento em minuto)



Fonte: Santos, A. S. et al. (2015)..

Tabela 1 – Caracterização do solo conforme NBR 7181 (1984) para estimação K_s

Descrição	Símbolo	Solo a 30 cm	Solo a 150 cm
Textura Granulométrica	SSC (%)	89,25% areia 10,75% silte 0% argila	86% areia 13% silte 1% argila
Densidade de campo	BD (g/cm ³)	1,52	1,52
Coefficiente Permeabilidade	K_s	549,75	461,40

Fonte: Lab. Caracterização de Solos – Eng. Civil – COPPE/UFRJ e simulações do Hydrus 1D.

Nota: SSC: Sand, Silt and Clay (areia, silte e argila), BD: bulk density (densidade de campo)..

Os resultados dos ensaios de classificação granulométrica possibilitaram uma maior confiabilidade dos parâmetros de condutividade do solo, estimados pelo Hydrus 1D, servindo de base para a validação dos dados da tabela 2. Esses parâmetros são de extrema relevância para a estimação do nível de concentração de contaminantes no solo, ou seja, quanto

maiores os valores de K_s , maior será a possível concentração de determinado poluente infiltrado no solo, sendo útil na avaliação dos impactos sobre o aquífero freático.

Os valores médios obtidos, para solos arenosos, são próximos de valores obtidos em outros estudos, como o de Rawls et al. (1982). A permeabilidade neste trabalho pode

variar entre 6 a 21 cm/h (144 a 504 cm/dia) para solos de textura arenosa. Os valores de K_s médio calculado por Rawls et al. (1982) para solos arenosos (sand) tomaram como base em 762 amostras de solo arenoso. Nos estudos com *PTF's* de Carsel e Parrish (1988) a K_s para solos de textura arenosa podem chegar até 712,8 cm/dia. No trabalho de Fetter (1988), a permeabilidade para solos arenosos (areia fina), pode variar entre 100 a 1000 cm/dia, considerando uma variação percentual do teor de umidade de 0,4 a 40 %.

Foram obtidos resultados nas colunas de PVC do CTR/UDESC e posteriormente comparados com outros ensaios realizados em aparelhos e equipamentos específicos do Laboratório de Caracterização de Solos da COPPE/UFRJ. Verificando os índices de incerteza padrão (*IP*) calculados, com 95% de confiança da distribuição gaussiana, os valores mensurados de umidade residual para os laboratórios da COPPE apresentaram *IP* maior do que os valores estimados pelo CTR. Quanto à umidade saturada o *IP* foi maior para os valores mensurados no laboratório do CTR. Por fim, em relação à permeabilidade (K_s), os valores de menor incerteza padrão foram para o laboratório do CTR, evidenciando a eficiência de mensuração da bancada desenvolvida. O *IP* foi calculado a partir dos valores de desvio padrão experimental (*DPE*), desvio padrão

do valor médio (DPV_m) e incerteza residual sistemática (*IRS*).

Para os parâmetros da COPPE, sabe-se que dado à incerteza/erro padrão (*IP*) para a permeabilidade (K_s), o valor obtido pela média e mais representativo entre 437,28 e 283,00 é o valor de 360,29 cm/dia. Para umidade residual até 30 cm, o valor médio entre 0,0076 e (-) 0,002532 é o valor de 0,0025. Em relação à umidade residual de 30 a 150 cm, entre 0,0074 e (-) 0,0027 o valor médio dos dados é 0,0024. A umidade saturada até 30 cm, o valor médio é 0,4173 entre 0,4237 e 0,4108, para a profundidade de 30 a 150 cm, o valor médio fica entre 0,4306 e 0,4205. Foi utilizado o programa OriginLab para o cálculo estatístico dos índices relacionados na tabela 2 a seguir:

Para os dados calculados no laboratório CTR, o *IP* correspondente para a permeabilidade (K_s), gerou um valor médio entre 514,50 e 402,52 cm/dia para a profundidade até 30 cm, e entre 496,60 e 370,90 cm/dia para a profundidade de 30 a 150 cm. A umidade residual até 30 cm, considerando o intervalo de incerteza entre 0,0294 e 0,0208 o valor mais representativo dos dados é 0,0251, para a profundidade de 30 a 150 cm, o intervalo ficou entre 0,0163 e 0,0152, cujo valor mais representativo dos dados é 0,0157. Por fim, para a umidade saturada até 30 cm, o valor entre 0,3869 e

Tabela 2– Parâmetros físicos e hidráulicos medidos em bancada no CTR/UDESC em 2013

Descrição	Símb.	IP	0 a 30 cm	IP	30 a 150 cm
Umidade residual	Q_r	0,00429	0,0240	0,00058	0,0161
Umidade saturada	Q_s	0,05055	0,3517	0,02766	0,3750
Const. Permeabilidade	K_s	55,99	458,51	62,85	433,75

Fonte: Software estatístico OriginLab.

0,2858 mais representativo dos dados foi 0,3363, para a profundidade de 30 a 150 cm, o valor representativo foi de 0,3683 para o intervalo de incerteza entre 0,3959 e 0,3406.

Os parâmetros médios para a densidade de partículas (DP) foram de 2,6063 (g/cm^3) para a profundidade de 30 cm e de 2,6460 (g/cm^3) para a profundidade de 150 cm (conforme ensaios da COPPE/UFRJ). Os valores obtidos DP estimados nos laboratórios do CTR/UESC foram de 2,3836 (g/cm^3) para 30 cm e de 2,4566 (g/cm^3) para 150 cm. De forma geral os valores médios para a compactação do solo foi de 30,5 % (30 cm) e 28 % (150 cm). O volume de água percolada foi de 1761 ml/h para a profundidade de 30 cm e de 1591 ml/h para a profundidade de 150 cm. A retenção máxima ocorre no solo saturado com até 86 % de retenção da água, sendo que a retenção mínima ocorre no solo não saturado com um resíduo de 6,55 % de água.

Os valores médios obtidos, para solos arenosos, são próximos de valores obtidos em outros estudos, como o de Rawls et al. (1982). Neste trabalho, a faixa média para umidade residual é de 0,001 a 0,039 (cm^3/cm^3), e para a umidade saturada de 0,374 a 0,500 (cm^3/cm^3). A permeabilidade pode variar entre 6 a 21 cm/h (144 a 504 cm/dia) para solos de textura arenosa. Os valores de K_s médio calculado por Rawls et al. (1982) para solos arenosos (*sand*) tomaram como base 762 amostras de solo arenoso.

Conclusão

A bancada desenvolvida para mensuração do coeficiente de permeabilidade forneceu informações relevantes, com padrões estimados dentro das faixas cientificamente referenciadas. Possibilitou a execução com

rapidez e baixo custo de dois procedimentos, sendo possível também a aferição de outras informações importantes, como nível de compactação, velocidade do fluxo efluente, nível de retenção do fluido e velocidade de decaimento da carga inicial dos fluídos. Apesar dos ensaios serem realizados para solos arenosos, a bancada permite a estimação dos parâmetros em outras texturas de solo, sendo necessário, no entanto, a correta saturação prévia da coluna (maior tempo de saturação para solos argilosos).

Os resultados obtidos com a utilização das equações de pedotransferência do Hydrus 1D, a partir da textura granulométrica (SSCBD), também ficaram próximas das medidas obtidas com a bancada de coluna de PVC. Salienta-se que nesse caso, o ideal é a utilização das medidas mais conservadoras, isto é, em procedimentos para modelagem e análise da contaminação ambiental no solo, é mais conveniente a utilização do maior valor estimado. Neste estudo, o valor para K_s mais conservador foi observado nas estimativas do Hydrus 1D. Outra questão é que em procedimentos onde se prioriza dados reais do solo, a utilização da bancada com a estimativa da K_s em laboratório se torna imprescindível. Modelagens que permitem a análise da dinâmica hidráulica no solo preconizam a utilização de parâmetros experimentais medidos em campo ou laboratório, neste ínterim, a metodologia aplicada neste trabalho, como também os equipamentos de baixo custo utilizados são regularmente adequados.

A validação correta dos dados estimados, assim como, a redução das incertezas operacionais dos ensaios, devem ser pautadas pela incansável repetição das medidas, com amostras relevantes e adequadamente preparadas. A diferença preponderante

das metodologias de mensuração da permeabilidade por equipamentos digitais, para os equipamentos de operação manual está no atento controle dos procedimentos de preparação das amostras, como também na correta aplicação das normas de cada ensaio. Apesar do alto risco na geração de incertezas nas medições, a bancada com colunas de

PVC desenvolvida neste trabalho foi eficiente em seu propósito, que foi estimar com moderada exatidão os níveis do coeficiente de permeabilidade para solos arenosos. Procedimento que pode ser replicado para outras estruturas de solo e utilizado em diversos estudos vinculados a avaliação da contaminação ambiental de solos.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. **Hydraulic properties of porous media**. Fort Collins: Colorado State University, 1964.(Hidrol. Pap. 3).

BUDIMAN, M.; MCBRATNEY A. B.; MENDONÇA SANTOS, M. de L.; SANTOS H. G. dos. **Revisão sobre funções de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003.

CARSEL, R. F.; PARRISH, R.S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. **Water Resources Research**, Washington, v.24, p.755-769, 1988.

DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. **Water Resources Research**, v.32, n.9, p. 211-223, 1994.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. CNPS, 2 ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997.

FETTER, C.W. **Applied Hydrogeology**. 2. ed. Columbus: Merrill Publishing Company, 1988. 591p.

KLUTE, A.; DIRKSEN, C. **Conductivities and diffusivities of unsaturated soils**. Methods of soil analysis. Part, v. 1, p. 687-734, 1986.

KOSUGI, K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. **Water Resources Research**, v.32, n.9, p.2697-2703, 1996.

JURY, W. A.; HORTON, R. **Soilphysics**. 6. ed. New york: John Wiley& Sons, 2004.384 p. ISBN-13: 978-0471059653

MOREIRA, M. D. **Areia silicosa de alta pureza de Santa Maria Eterna**: Belmonte, Bahia. Salvador: CBPM, 2005.

MOREIRA, M. D. **Projeto Santa Maria Eterna**. Salvador: CBPM, 1997.

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; SAXTON, K. E. Estimation of soil water properties. **TRANSACTIONS of the ASAE**, v. 25, n. 5, p. 1316-1320, 1982.

SHUKLA, M. K. **Soil physics: An introduction**. 1. ed. Boca Raton: CRC press, Taylor & Francis Group, 2013.

ŠIMŮNEK, J. M.; SEJNA, M.; SAKAI, H.; SAITO, M.; VAN GENUCHTEN, M. Th. **The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media** Version 4.0x, Hydrus Series 3, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, CA, USA, 2008.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.