

IX-040 – ESTIMATIVA SIMPLIFICADA DA POROSIDADE DRENÁVEL, COM DIFERENTES FLUIDOS, EM CONDIÇÕES DE LABORATÓRIO

Carlos Rosemberg Borges de Carvalho⁽¹⁾

Engenheiro Agrícola e Ambiental pela Universidade Federal Fluminense (UFF). Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Federal Fluminense (LATEC-UFF). Mestre em Engenharia Civil - área temática de Meio Ambiente pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). Doutorando em Engenharia Civil - área temática de Meio Ambiente pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). Consultor do Grupo de Estudo e Tratamento de Resíduos Sólidos (GETRES/COPPE/UFRJ).

Juliana Fernandes dos Santos Garcia⁽²⁾

Engenheira Agrícola e Ambiental pela Universidade Federal Fluminense (UFF). Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Federal Fluminense (LATEC-UFF). Mestranda em Engenharia Civil - área temática de Recursos Hídricos e Meio Ambiente pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ).

Endereço⁽¹⁾: Avenida Pedro Calmon S/Nº - Ilha do Fundão, cidade universitária - Rio de Janeiro - RJ - CEP:21941-596 - Brasil - e-mail: carlosrosemberg@coc.ufrj.br

RESUMO

A porosidade drenável (μ) é um parâmetro relevante no dimensionamento de sistemas de drenagem subterrânea e em estudos de movimento de água e poluentes no perfil do solo. É uma característica hidrodinâmica bastante variável na superfície e no perfil do solo, podendo resultar em diferenças significativas no espaçamento entre drenos, e na análise do transporte de contaminantes. Alguns métodos de determinação exigem equipamentos complexos são trabalhosos e/ou de custo elevado. Entre os mais simples estão o de rebaixamento do Lençol e os que relacionam μ com a Condutividade Hidráulica saturada (K_0). Neste trabalho estudou-se um dispositivo simplificado para a determinação de μ , com amostras de solo alteradas e não-alteradas, saturadas com água ou óleo diesel. Utilizou-se 12 cilindros de PVC de diâmetro de 0,10 m e altura de 0,25 m, para três repetições com cada tipo de solo, argiloso, siltooso e arenoso, tendo sido saturados com água e somente o solo arenoso com óleo diesel. Os resultados médios de μ , para os solos, argiloso, siltooso, arenoso, respectivamente foram 1,91; 3,14; e %. No solo arenoso saturado com óleo diesel, obteve-se $\mu = 1,11\%$. Os custos são compatíveis e os procedimentos simples. Para validação necessitam-se melhores comparações com os métodos normatizados.

PALAVRAS-CHAVE: Drenagem, porosidade drenável, solos.

INTRODUÇÃO

Um parâmetro de grande relevância para dimensionar sistemas de drenagem é a porosidade drenável (μ), também denominada porosidade livre de água ou porosidade efetiva, é definida como o volume de água que é drenada livremente por unidade de volume de solo, através do rebaixamento do lençol freático.

KIEHL (1979) define a porosidade total como sendo o volume de vazios ou aquele espaço do volume de solo não ocupado pela matriz, representada pelo conjunto dos seus componentes orgânicos e inorgânicos. Já BELTRAN (1986) e PIZARRO (1978) definem μ como sendo uma fração da porosidade total na qual a água se move livremente, cujo valor equivale ao conteúdo de ar presente no solo, quando este se encontra na capacidade de campo.

TAYLOR (1959) define μ como sendo a relação entre o volume de água drenada livremente, pela ação da gravidade, e, o volume de solo drenado.

A porosidade total (n) do solo se divide em macroporosidade e microporosidade. A primeira é a razão entre o volume total de poros e o volume total da amostra. Já a segunda é a razão do volume de microporos da amostra

e o volume da amostra. A microporosidade é o espaço onde fica retida a água quando o solo se encontra à capacidade de campo.

As areias ou solos que possuem texturas mais espessas têm grandes valores de μ , devido ao espaço entre as suas partículas, enquanto as argilas ou solos de textura mais fina apresentam menores valores. Isso significa que para uma mesma quantidade de água drenada, um solo arenoso apresenta uma menor variação do lençol freático do que um solo com maior teor de argila.

O valor de μ é um parâmetro hidrodinâmico do solo de grande importância para fins de dimensionamento de sistema de drenagem subterrânea, sendo fundamental para o cálculo do espaçamento de drenos. Esta pode ser determinada em campo e em laboratório. Os métodos de campo utilizados são os que utilizam a taxa de descarga dos drenos e os que utilizam dados da carga hidráulica.

Nos métodos de laboratório são utilizados a Mesa de Tensão e o ASTM D 425 (Standart Method for Centrifuge Moisture Equivalent of Soils). No primeiro, a amostra é submetida à sucção de 6 a 10KPa até atingir a condição de equilíbrio. Já o segundo, consiste em utilizar uma centrífuga para submeter à amostra a uma rotação 1000 vezes maior a força da gravidade durante o período de uma hora.

A Condutividade Hidráulica saturada (K_0) é um parâmetro fundamental para a determinação de espaçamento de drenos, sendo também utilizada para a estimativa da μ , em métodos mais simplificados através de equações empíricas que a correlacionam μ , como Van BEERS (1965), POULSEN et al. (1999) e CHOSSAT & SAUGNAC citado por Beltran (1986).

Este parâmetro pode ser determinado por métodos de campo e laboratório, fundamentados na Lei de Darcy, como equação 01.

$$q = \frac{V}{A \cdot \Delta t} = -K_0 \cdot \frac{\Delta \Phi}{L} = -K_0 \cdot i \quad \dots \text{eq. (01)}$$

Em que:

$i = \Delta \Phi / L$ = gradiente hidráulico, m/m;
 $\Delta \Phi$ = mudança de potencial total, m;
 L = altura do solo, m;
 q = fluxo, m/s;
 V = volume de água coletado, m³;
 Δt = intervalo de tempo, s;
 A = seção transversal da coluna de solo, m²;
 K_0 = Condutividade hidráulica saturada, m/s.

Assim, Van BEERS (1965), sugere estimar μ a partir do valor da condutividade hidráulica do solo saturado (K_0), conforme a equação 02.

$$\mu = \sqrt{K_0} \quad \dots \text{eq (02)}$$

Em que:

μ = porosidade drenável, % e;
 K_0 = condutividade hidráulica, cm.d⁻¹

QUEIROZ (1997) apresenta um modo alternativo de cálculo da μ , em campo, a partir de medidas de taxas de descarga e de cargas hidráulicas, sem necessidade de utilização de processos gráficos. Neste trabalho foram encontrados resultados de $\mu = 3,87\%$ e $\mu = 6,10\%$.

QUEIROZ (1995) obteve valor médio de $\mu = 6,413\%$, em 84 determinações de laboratório o que corresponde a uma diferença de 5%, aproximadamente, acima do valor de μ_2 . Queiroz ressalta que se utilizando métodos de laboratório, o pequeno volume amostral contribui para aumentar a variância dos dados, sendo preferível, para fins de drenagem subterrânea, o uso dos métodos de campo, os quais são representativos de um volume maior de solo, o que diminui o efeito da variabilidade espacial. Porém, os métodos de campo exigem maior investimento de tempo e mão-de-obra.

MOVIMENTO DE CONTAMINANTES NO SOLO

THOMÉ e KNOP (2003) reportam que o transporte de contaminantes em solos pode se dar em meio a uma ou mais camadas, estando saturadas ou não. A migração destes compostos é influenciada por diversos fatores que determinam seu grau de movimentação. O deslocamento destes compostos não depende apenas do fluxo do fluido em que as substâncias estão dissolvidas, mas também de mecanismos que também dependem de processos físicos, químicos e biológicos, aos quais estas substâncias são submetidas. Compreender esses mecanismos juntamente com a análise e modelagem numérica do problema e com programas de monitoramento de campo, pode-se avaliar a migração de poluentes no solo.

Para MONACADA (2004) o transporte de massa depende de três fatores: a substância contaminante, o meio poroso e as condições ambientais. Além das características do contaminante, são importantes o teor e tipo de matéria orgânica, a distribuição granulométrica, a mineralogia e teor de finos, distribuição de vazios, capacidade de troca catiônica e o grau de saturação do meio poroso onde ocorrerá o transporte. Os mecanismos de movimento de contaminantes em meios porosos classificam-se em Processos Físicos e Processos Bio-Físico-Químicos. Nos Processos Físicos tem-se a Advecção e a Dispersão Hidrodinâmica, sendo esta dividida em Dispersão Mecânica e Difusão Molecular. Na Advecção a porosidade é usada para determinação da velocidade de fluxo da água que carrega o poluente, conforme a equação 03:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v_x \times \frac{\partial C}{\partial x}, \text{ sendo : } v_x = \frac{k}{n} \times i \quad \dots \text{eq (03)}$$

Em que:

C = concentração do soluto, g/cm³;
v_x = velocidade de percolação, cm/s;
k = coeficiente de permeabilidade, cm/s;
n = porosidade total;

Na determinação dos parâmetros físicos de transporte em laboratório, como o Coeficiente de Difusão Molecular Efetivo e a Dispersão Hidrodinâmica, têm-se as metodologias: Método do Regime Permanente, Método do Time-Lag e Método de Coluna. No Método de Coluna plota-se os valores da Concentração Relativa do poluente versus o Volume de Poros Percolados, a qual corresponde ao inverso da porosidade drenável (1/μ), para a obtenção das Curvas de Break-Through, conforme SHACKELFORD (1991).

OBJETIVOS GERAL

A partir do estudo de TAYLOR (1959), o presente trabalho visou à idealização de um dispositivo de fácil construção, com materiais de baixo custo, para possibilitar maior rapidez e facilidade na estimativa de μ, em condições de laboratório, visando seu uso em equações de drenagem de regime transiente, bem como para a avaliação de parâmetros aplicados às análises de migração de poluentes no solo.

ESPECÍFICOS

- (1) testar o uso de cilindros de PVC para a coleta de amostras de solo não alteradas em condições de campo e seu uso na determinação de μ em laboratório;
- (2) determinar K₀, pelo método do permeâmetro de carga constante, para os três tipos de materiais porosos, para estimativa de μ por Van BEERS (1965);
- (3) comparar valores de μ obtidos pelo método de TAYLOR (1959), usando cilindros de PVC, com o de Van BEERS (1965); além de observar os resultados obtidos para amostras alteradas com aqueles obtidos para amostras não-alteradas;

(4) determinar μ em solo arenoso, utilizando tanto água quanto Óleo Diesel como fluidos de saturação inicial em amostras não-alteradas.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no Departamento de Engenharia Agrícola e Meio Ambiente da Escola de Engenharia, na Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ, no laboratório de Estruturas e Hidráulica Ambiental.

Os solos foram coletados em três áreas com características diferenciadas, classificadas como uma área de várzea, uma área de encosta e uma área de baixada plana, sendo respectivamente os solos dos seguintes tipos: siltoso, argiloso e arenoso. Os dois primeiros foram coletados no município de ITABORAÍ - RJ e o terceiro no município de Cachoeiras de MACACU - RJ.

Foram utilizados 12 (doze) cilindros de PVC de 0,10 m de diâmetro e altura 0,25 m, sendo três (3) cilindros de parede com espessura de 5 mm para a o solo argiloso. Realizaram-se três repetições para cada um dos tipos de solo. Na coleta das amostras não-alteradas, os cilindros de PVC foram posicionados perpendicularmente à superfície do solo, em seguida utilizando-se de uma marreta de borracha e um corpo sólido de madeira, usado para não danificar as paredes do cilindro de PVC, de modo a introduzi-lo no solo até a profundidade desejada.

No mesmo local onde foram retiradas as amostras classificadas como não-alteradas, retirou-se uma porção de cada tipo de solo a qual foi levada para o laboratório, peneirada e introduzida nos cilindros de PVC, caracterizando assim as amostras alteradas.

Com o diâmetro e a altura da amostra de solo contida no cilindro de PVC, obteve-se o volume de solo, que foi saturado com cada tipo de fluido e posteriormente drenado, Volume de Solo Drenado (VSD).

Para a saturação de cada amostra, cada cilindro de PVC, contendo solo, foi inserido em um recipiente contendo água ou Óleo Diesel, até que o nível de fluido fora do cilindro superasse o nível da superfície de material poroso em seu interior. O tempo de saturação médio foi de 24 h. O cilindro era posicionado para proceder a drenagem após se confirmar o afloramento de fluido (água ou Óleo Diesel) na superfície do material poroso. Somente as amostras não-alteradas de solo arenoso foram saturadas com Óleo Diesel, conforme Figura 01. As amostras foram totalmente saturadas a partir da base do cilindro para sua superfície. Para o procedimento do processo de drenagem as amostras foram colocadas em um cavalete de suporte, conforme Figura 02. Coletou-se o VAD e o Volume de Óleo Drenado (VOD) em cada cilindro.

Estes parâmetros foram aplicados à equação 04 para estimativa de μ , pelo método de TAYLOR (1959).

$$\mu = \frac{VAD}{VSD} \quad \dots \text{eq (04)}$$

Em que:

μ = porosidade drenável, cm^3/cm^3 ;
VAD = volume água drenada, cm^3 ;
VSD = volume de solo drenado, cm^3 ;
VOD = volume de óleo drenado.



Figura 01: Vista superior do modelo de saturação com óleo diesel.



Figura 02: Vista frontal experimento montado em laboratório

Os resultados de μ obtidos a partir do dispositivo experimental utilizado em laboratório e estimadas pelo método de TAYLOR (1959) estão no Quadro 01.

Quadro 01. Porosidade drenável em saturação com água

Amostras não-alteradas					
Material	D	HSD	VSD	VAD	□
	cm	cm	cm³	cm³	%
Argiloso(1)	10	20,2	1586,51	0	0,00
Siltoso(1)	10	19,6	1539,38	12,3	0,80
Arenoso(1)	10	22,2	1743,59	14,0	0,86
Argiloso(2)	10	20,8	1633,63	0	0,00
Siltoso(2)	10	20,8	1633,63	9,9	0,61
Arenoso(2)	10	22,0	1727,88	12	0,69
Argiloso(3)	10	20,6	1617,92	13	0,80
Siltoso(3)	10	19,8	1555,09	21	1,35
Arenoso(3)	10	21,3	1672,90	35	2,09
Amostras alteradas					
Argiloso(1)	10	12	942,48	16	1,70
Siltoso(1)	10	15,5	1217,37	37,8	3,11
Arenoso(1)	10	10	785,40	6,7	0,85
Argiloso(2)	10	12	942,48	34,5	3,66
Siltoso(2)	10	15,5	1217,37	78,0	6,40
Arenoso(2)	10	10	785,40	28,0	3,56

De acordo com o Quadro 01 verifica-se que a textura do solo influencia na estimativa de μ , já que as amostras de textura mais grossa apresentaram maiores valores, enquanto as de menor textura têm menores valores.

No Quadro 02 estão os valores médios de K_0 em cm/dia, obtidos utilizando-se de um permeâmetro de carga constante, para os três tipos de materiais porosos e os valores médios de μ , estimados pelo método de VAN BEERS (1965). Os quais foram de 4,73; 1,42 e 2,09%, respectivamente para os solos; arenoso, siltoso e argiloso.

Quadro 02: Valores médios da porosidade drenável

Tipo de Solo	K médio (cm/d)	μ (%)
Solo Arenoso	22,33	4,73
Solo Siltoso	2,02	1,42
Solo Argiloso	4,36	2,09

Com estes dados foi possível confrontar os valores médios de μ com aqueles obtidos no presente estudo como apresentados no Quadro 03 e Quadro 04. Os valores médios de μ obtidos em laboratório, pelo método de Taylor, foram menores que os determinados pelo método de Van Beers, do Quadro 02. Para as amostras não-alteradas os valores de μ foram respectivamente 0,8; 0,92 e 1,21%, para os solos, argiloso, siltoso e arenoso, sendo que para as amostras alteradas foram $\mu = 2,68$; 4,75 e 2,20%; respectivamente para os solos argiloso, siltoso e arenoso.

Quadro 03: Valores médios de μ (%) para os tipos de solo saturados com água

Tipo de solo	Tipo de amostras	
	Alteradas	Não alteradas
Argiloso	2,68	0,8
Siltoso	4,75	0,92
Arenoso	2,20	1,21

Os valores de μ determinados no presente trabalho são inferiores àqueles determinados por QUEIROZ (1997) de $\mu = 3,87\%$ e $\mu = 6,10\%$ e também em QUEIROZ (1995) de $6,413\%$.

Quadro 04: Valores de μ em amostras não-alteradas de solo arenoso saturado com Óleo Diesel

D	HSD	VSD	Repetições			
			1		2	
			VOD	<input type="checkbox"/>	VOD	<input type="checkbox"/>
cm	cm	cm ³	cm ³	%	cm ³	%
10	22,2	1743,59	18,0	1,03	15,0	0,86
	22,0	1727,88	26,0	1,50	22,0	1,27
	21,3	1675,90	19,0	1,13	17,0	1,01

D = Diâmetro do tubo de PVC; HSD = Altura de solo drenado;
VSD=Volume de solo drenado; VOD = Volume de Óleo Diesel.

Na obtenção dos dados em laboratório, verificou-se que duas amostras do solo argiloso não-alterado e as amostras alteradas de solo arenoso tiveram dificuldade para saturar, talvez devido ao fato de apresentarem certa compactação. Também se observou que para o solo siltoso, parte da água ao se elevar no processo de saturação, seguia um caminho preferencial junto às paredes internas do cilindro, interferindo no processo de saturação do solo, o que dificultou o procedimento gerando imprecisão no processo. Esses caminhos preferenciais foram criados possivelmente em função da vibração das paredes pelo impacto do martelo de borracha com o corpo sólido de madeira, no momento da coleta das amostras em campo. Nas amostras do solo arenoso que foram saturados com Óleo Diesel, após duas repetições ocorreu destruição das estruturas internas do solo, fazendo com que este se desprendesse do cilindro de PVC.

CONCLUSÕES

Para as amostras não-alteradas os valores de μ foram respectivamente 0,8; 0,92 e 1,21%, para os solos, argiloso, siltoso e arenoso, sendo que para as amostras alteradas foram $\mu = 2,68$; 4,75 e 2,20%; respectivamente para os solos argiloso, siltoso e arenoso.

Nas amostras não alteradas saturadas com Óleo Diesel, o valor médio de μ foi de 1,11%. Entretanto, na terceira repetição ocorreu uma completa destruição da estrutura do solo pela ação do Óleo Diesel, o que impediu a determinação deste valor.

Os valores de porosidade drenável tanto para água quanto para o Óleo Diesel não diferiram significativamente entre si, porém seria interessante o teste com maior número de amostras de modo a se ter dados para as abordagens estatísticas pertinentes. Observou-se que enquanto a água percola mantendo inalterada a estrutura do solo, o Óleo Diesel apresentou ação degradante sobre a mesma.

Os resultados para o Óleo Diesel podem ser utilizados na obtenção das Curvas de *Break-Through*, pelo Método da Coluna, conforme SHACKELFORD (1991).

Os valores de μ estimados pelo modelo experimental proposto estiveram sempre inferiores aos calculados tanto pelo método de Van Beers, quanto em relação aos métodos de campo e de laboratório encontrados por QUEIROZ (1995) e QUEIROZ (1997).

Nas condições em que foi realizado o presente trabalho pode-se concluir que o modelo proposto apresentou-se de simples operação para estimativa da porosidade drenável utilizando amostras de solo não-alteradas e alteradas, tendo revelando-se economicamente viável e com possibilidades de replicação face à simplicidade verificada na aplicação.

Os valores da porosidade drenável obtidos pelo método de Taylor foram consistentes com as texturas dos solos em estudo. Visando uma melhor análise dos resultados, será necessária em uma próxima etapa, a comparação com resultados obtidos a partir de Métodos Normalizados, tais como a Mesa de Tensão (no qual a amostra é submetida à sucção de 6 a 10 KPa até atingir a condição de equilíbrio.) E a ASTM D 425, método da centrífuga, que consiste em girar a amostra em uma velocidade igual a 1000 vezes a força da gravidade por uma hora.

Além disso, serão necessários mais testes e observações no modelo proposto para que se melhore o processo de saturação e de drenagem das amostras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT – Associação Brasileira de Norma Técnicas. (1998). Requisitos para elaboração de projetos de drenagem subterrânea para fins agrícolas. Rio de Janeiro, ABNT, 1998, 3p. NBR 14144: 1998.
2. Braun, H.M.H.; Kruijne, R. (1994). *Soil conditions*. In: RITZEMA, H. P. (Ed.). Drainage principles and applications. 2. ed. Wageningen: International Institute for Land Reclamation and Improvement, p. 77-110.
3. Ferreira, M.M. & Dias Junior, M. S.(2001). *Física do solo. Relação de massa e volume dos constituintes do solo*. Lavras: UFLA/FAEPE, 28-29 p.
4. FAO.(1986). Drainage design factors; 28 questions and answers. Rome, FAO, 52p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 38).
5. Libardi, P.L. *Dinâmica da água no solo*. (1995). 1^a ed. Piracicaba, 497p.
6. Michael, M. B. and Larry, A. K. A (2003). *Practical Technique for Quantifying Drainage Porosity*. PTS Laboratories. www.ptslabs.com/documents/NGWA2003.pdf (acedido em 01 de março de 2010).
7. MONCADA, M.P.H. (2004). Estudo em laboratório de características de colapso e transporte de solutos associadas à infiltração de licor cáustico em um solo laterítico. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUCRJ. Rio de Janeiro, 190p.
8. Queiroz, J.E. (1997). *Parâmetros hidrodinâmicos de um solo de várzea para fins de drenagem subterrânea*. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo (ESALQ). Piracicaba.
9. SHACKELFORD, C. D. (1991) Laboratory diffusion testing for waste disposal – A review. *Journal of Contaminant Hydrology*. n. 7, p.177-217.
10. Skaggs, R.W.; Kriz, G.L.; Bernal, R.F. (1973). Field evaluation of transient drain spacing equations. *Transactions of the ASAE*, v.16, n.3, p.590-5.
11. Taylor, G. S. (1959). Drainable porosity evaluation from outflow measurements and its use in drawdown equations. *Soil Science*, Ohio, 90(6): 338-43.
12. White, R.E. (1985). The influence of macropores on the transport of dissolved and suspended matter through soil. *Advanced Soil Science*, v.3, 1985.