

CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE AREIA EM SOLOS ARTIFICIALMENTE COMPACTADOS

Marcos Vinícios Coelho Verner¹, Glaucio Luciano Araújo².

¹ Graduando em Engenharia Civil, FACIG, marcosvinicioscv@gmail.com

² Doutor em Engenharia Agrícola, FACIG, glaucio.araujo@facig.edu.br

Resumo- A condutividade hidráulica do solo saturado, analogamente pode ser estudada com sendo a velocidade com que a água atravessa o meio poroso denominado solo, sendo que a mesma é expressa pela lei de Darcy, sabe-se que a granulometria do solo exerce influências sobre este processo, desta forma, no intuito de verificar a influência de partículas da fração areia na condutividade hidráulica um experimento foi desenvolvido no laboratório de solos da Faculdade de Ciências Gerenciais de Manhuaçu, sendo utilizada a metodologia do permeâmetro de carga constante, para corpos de prova moldados e compactados artificialmente em um cilindro do tipo Proctor normal. Desta forma o objetivo deste experimento foi investigar como a água se movimentava no solo frente aos diferentes teores de areia presentes nos corpos de prova. O estudo avaliou quatro proporções diferentes de adição de areia, sendo estas iguais a 40%, 50%, 60% e 70% do corpo de prova. Conclui-se que a proporção de areia exerce influências na condutividade hidráulica do solo saturado.

Palavras-chave: Condutividade Hidráulica; Permeabilidade; Teor de Areia; Compactação.

Área do Conhecimento: Engenharias.

1 INTRODUÇÃO

A condutividade hidráulica do solo é uma propriedade que expressa a facilidade com que a água nele se movimenta, sendo de extrema importância para o estudo e entendimento dos recalques que podem vir a ocorrer em uma determinada área na qual se constrói.

A primeira equação utilizada para quantificar o movimento da água no solo foi introduzida por Henry Darcy, em 1856, o qual trabalhou com colunas de areia saturada com água. Essa equação, conhecida como equação de Darcy, estabelece que a quantidade de água que passa por unidade de tempo e de área pelo meio poroso saturado é proporcional ao gradiente de potencial total da água nesse meio. A constante de proporcionalidade foi denominada por Darcy de condutividade hidráulica, hoje conhecida como condutividade hidráulica do solo saturado, representada pelo símbolo "K" (GONÇALVES e LIBARDI, 2013).

A condutividade hidráulica do solo saturado descreve a funcionalidade de seu sistema poroso, englobando propriedades relacionadas com a sua porosidade, como quantidade, tamanho, morfologia, continuidade e orientação dos vazios do solo. Pelo fato de a condutividade hidráulica na condição saturada depender em grande parte da forma e continuidade do sistema de vazios do solo, essa varia fortemente de um local a outro, apresentando valores extremos em determinados locais e podendo diferir também nas distintas orientações do solo. A condutividade hidráulica na condição saturada é mais dependente, portanto, da estrutura do que da textura do solo e, ao elevar o grau de agregação de um solo, o valor dela aumenta. O efeito da estrutura e em especial dos macroporos (diâmetro maior do que 50 μm) possibilita a um solo argiloso exibir valores de K0 similares ao arenoso (GONÇALVES e LIBARDI, 2013). Para Libardi (1999), todas essas propriedades do espaço poroso que influenciam a condutividade do solo podem ser reunidas no termo único "geometria porosa dos solos", e desta forma é possível entender a sua profunda relação com a compactação e adensamento dos solos, solos com menor índice de vazios (e) tendem a apresentar menores valores para condutividade hidráulica.

Segundo Silva & Kato (1997), a macroporosidade é fator de extrema importância na condutividade hidráulica do solo saturado e sua redução provoca diminuição nos valores de K. Esses autores observaram que pequena diferença de macroporosidade entre áreas foi acompanhada por grande diferença nos valores de K, evidenciando a importância da macroporosidade na condutividade

hidráulica, ou seja, o efeito da estrutura do solo.

Existem vários métodos de laboratório para a determinação da condutividade hidráulica, mas quando se trata de analisar a influência dos solos com suas características, nível de compactação, entre outros aspectos em solo saturado, uma das metodologias mais indicadas é a do permeâmetro de carga constante (MILLAR, 1974, p.26). A condutividade hidráulica do solo medida por meio do permeâmetro de carga constante revela um ponto importante para esse tipo de estudo sendo aplicável em vários tipos de solo, principalmente os de característica arenosa.

A análise da permeabilidade do solo é de grande relevância e é feita em diversas áreas, como o da agricultura, construção civil, estudos geotécnicos, ambiental, construções de barragens e entre outros setores, onde é importante conhecer o nível de percolação de líquidos através da porosidade do solo. Por meio dos resultados desses testes pode-se ter informações suficientes para otimizar, melhorar e adequar as necessidades de cada caso. Desta forma o objetivo deste experimento foi investigar como a água se movimenta no solo frente aos diferentes teores de areia presentes nos corpos de prova, simulando o que aconteceria nos solos arenosos.

2 METODOLOGIA

O solo utilizado no experimento foi coletado na zona rural do município de Espera Feliz, MG, o mesmo foi coletado em uma profundidade de 100 cm e em seguida colocado para secar ao ar livre como é mostrado na Figura 1. A areia utilizada foi do tipo fina com granulometria entre 0,06 mm e 0,2 mm, para iniciar o experimento o solo e a areia foram passados em uma peneira de 2mm.

Figura 1 – Secagem ao ar livre



Foram confeccionados quatro corpos de prova para fins de comparação, sendo que para a confecção de cada um foram separados um total de 2kg de solo já misturados com a proporção de areia a ser testada, sendo os valores iguais a 40%, 50%, 60% e 70% de areia. Foram adicionados 200 ml de água na mistura de cada solo no intuito de permitir a moldagem do corpo de prova.

O primeiro passo para efetuar os ensaios foi aferir a teor de umidade de cada mistura de solo e areia, sendo este valor importante para a determinação do peso específico seco de cada solo nos corpos de prova. Para cada corpo de prova foram retiradas três porções de solo (Figura 2) para a determinação da umidade. A umidade foi determinada pelo método padrão de estufa termogravimétrico, mantendo a amostra à temperatura de 110C°, por 24 horas.

Figura 2 – Amostra para análise de umidade.



De acordo com a ABNT (NBR 6457, 1986, p.7, p.8):

Colocar a cápsula em estufa, à temperatura de 105°C a 110°C, onde deve permanecer até apresentar constância de massa. Normalmente, um intervalo de 16 a 24 horas é suficiente para a secagem do material, podendo intervalos maiores se necessário dependendo do tipo e quantidade de solo ou se o mesmo estiver muito úmido.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 6457, 1986, p.8), determina o teor de umidade, utilizando a seguinte expressão:

$$H = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} * 100$$

Onde:

H: teor de umidade, em %

M₁: massa do solo úmido mais a massa do recipiente, em g.

M₂: massa do solo seco mais a massa do recipiente, em g.

M₃: massa do recipiente, em g.

Para estabilizar o solo e formar os corpos de prova, usou-se o método de impacto para todas amostras de solo, os corpos de prova foram moldados em um cilindro do tipo Proctor, sendo o mesmo um tubo cilíndrico de aço inoxidável. Para produzir a energia de compactação utilizou um soquete metálico padrão, que acompanha o cilindro de Proctor. Foi utilizada apenas uma camada de solo, aferiu-se 17 golpes com o soquete de impacto para cada amostra, após o adensamento, realizou a raspagem superficial com o auxílio de uma espátula para nivelar a superfície de cada corpo de prova.

Para retirar o corpo de prova foi utilizado um extrator de amostras, representado na Figura 3, removeu-se o corpo de prova do centro e em seguida o mesmo foi pesado. A partir do procedimento realizado obteve-se um corpo de prova cilíndrico com dimensões padrão de diâmetro de 10 cm e altura de 7 cm.

Figura 3 – Cilindro Proctor Normal e Extração do corpo de prova.



O ensaio com o permeâmetro de carga constante foi utilizado para determinar a condutividade hidráulica do solo saturado de cada um dos corpos de prova moldados com solos arenosos. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 13292, p.01) a norma prescreve o método para a determinação do coeficiente de permeabilidade utilizando carga constante, com a água percolando através do solo, em regime de escoamento laminar.

No século XIX Henry Darcy realizou um experimento submetendo o solo à uma infiltração vertical, usando filtros de areia homogênea saturadas com água, desta forma quando o valor da vazão não mais sofria variações em relação ao tempo subentende-se que o equilíbrio dinâmico foi atingido. O princípio fundamental da lei é a relação da velocidade de percolação que é diretamente proporcional à perda de energia da água (LIBARDI, 2005, p.159).

O ensaio de permeabilidade com carga constante foi conduzido no laboratório de solos da FACIG. Para a realização do ensaio de permeabilidade, os corpos de prova foram acondicionados em

um cilindro que possui duas extremidades de vedação por um anel de borracha denominado permeâmetro. Na base do permeâmetro existe uma perfuração onde é coletada a vazão. A base do permeâmetro foi preenchida com brita nº 01 e nivelada com uma camada de areia (Figura 4).

Figura 4 – Camada de areia fina.



Para proteção e separação do corpo de prova da camada de areia, adicionou-se uma tela de aço (Figura 5a) e uma manta de feltro (Figura 5b). Para um melhor isolamento do corpo de prova também foi utilizado um anel de borracha (Figura 5c).

Figura 5 – Tela de aço (a), manta de feltro (b) e anel de borracha (c).



Após a montagem da base do permeâmetro, o corpo de prova foi colocado sobre o feltro. Conforme a Figura 6, aplicou-se bentonita com a função de vedação das laterais do corpo de prova, desta forma evitou-se o fluxo de água nas laterais, induzindo a passagem da água apenas pelo corpo de prova no sentido vertical. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 14545, 2000, p.04) diz que “A argila plástica deve ser do tipo bentonítica e será empregada na vedação do espaço entre o corpo-de-prova e a parede do permeâmetro”.

O mesmo método de estruturação da primeira camada, foi utilizado na camada superior do permeâmetro no entanto em sentido contrário de execução. Para separar a superfície do solo, colocou o anel de borracha de vedação, feltro e tela perfurada de aço, seguindo com a camada de areia e brita, para nivelar e evitar que água tome um caminho preferencial, adicionou-se mais uma camada de areia. Processo de montagem demonstrado em sequência de execução na Figura 7:

Figura 6 – Bentonita e corpo de prova



Figura 7 – Sequência da execução da última camada.



Para iniciar a análise, o permeâmetro foi vedado com a tampa de vedação do cilindro,

mostrado na Figura 8, sendo que a mesma possui anéis internos de vedação, que evitam vazamentos e erros na determinação da permeabilidade do solo.

Figura 8 – Tampa de vedação.



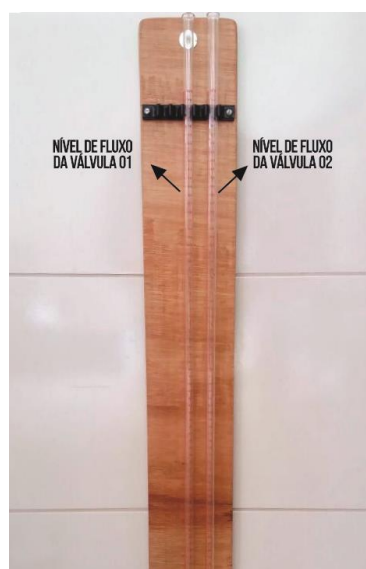
No ensaio de Permeâmetro (Figura 9b), o corpo de prova é submetido a uma carga hidráulica constante, o controle de entrada de água é exercido por um compartimento de armazenagem (Figura 9a), que possui uma entrada e uma saída por onde o excesso de água é escoado, mantendo o nível de água dentro do reservatório constante, por sua vez mantendo a carga hidráulica dentro do permeâmetro constante.

Figura 9a – Reservatório de Água (a esquerda), permeâmetro completo (a direita).



Com o compartimento de água acionado, o fluido foi liberado para dentro do permeâmetro (Figura 10a), onde o processo de condutividade hidráulica se inicia. Na válvula 01 houve o fluxo inicial que foi aferido em um tubo manométrico. Com o solo saturado, a água percorreu todo o corpo de prova até chegar ao nível da válvula 02, o fluxo de saída de água foi medido no segundo tubo manométrico. Conforme a NBR 13292 as medições dos tubos manométricos (Figura 10b) foram realizadas após a estabilização dos níveis de água dentro dos tubos (ABNT, 1995, p.6).

Figura 10 - Permeâmetro (a esquerda) e tubo manométrico (a direita).



Para fins de cálculo, depois das cargas hidráulicas estabilizadas, verificou-se as diferenças dos níveis de fluxo da válvula 01 (h_1) e da válvula 02 (h_2), em seguida mediu-se a vazão (Q) através da válvula de saída, medindo o tempo (T) e o volume (V) de água coletado no tempo em questão. Para determinar a vazão de água, utilizou-se a seguinte expressão:

$$Q = \frac{V}{T}$$

Onde:

Q: Vazão

V: Volume de água

T: Tempo

De acordo com LIBARDI (2005, p.160), a equação que representa a lei de Darcy é expressa da seguinte forma:

$$Q = K * A * \frac{h_1 - h_2}{L}$$

Onde:

Q: Vazão, em L/s.

K: Constante de condutividade hidráulica, em m/s.

A: Área da superfície do corpo de prova, em m^2 .

h_1 : Carga piezométrica da válvula 01.

h_2 : Carga piezométrica da válvula 02.

L: Comprimento do corpo de prova, em metros.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 são apresentados os valores correspondente de porcentagem de areia, Carga Piezométrica inicial (h_1) e final (h_2), vazão (Q), Área, Altura do corpo de prova (L), Umidade (H), Peso Específico seco (Y_s), Peso Específico natural (Y_n) e da condutividade hidráulica (K) das misturas de solo e areia testadas.

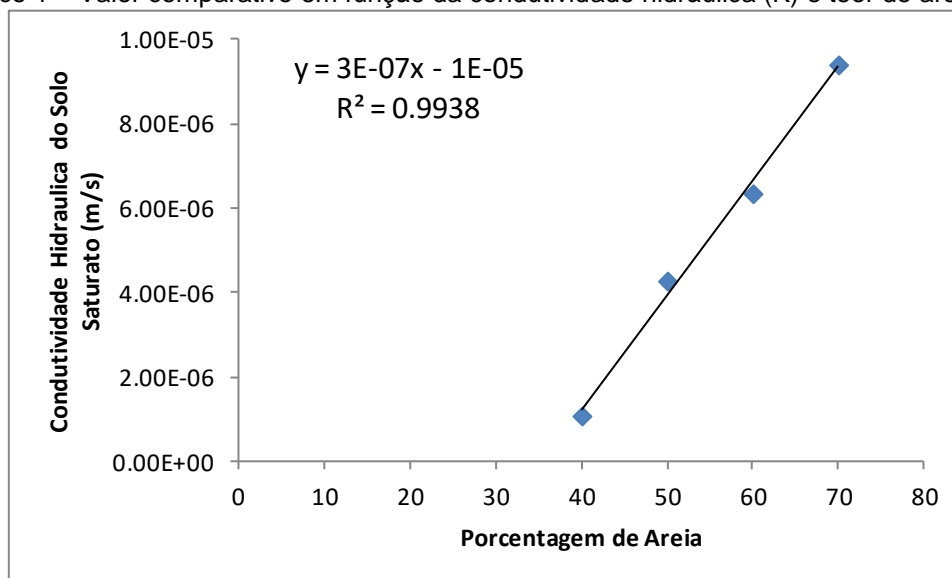
Tabela 2 – Valores da porcentagem de areia, carga piezométrica inicial (h_1) e final (h_2), vazão (Q), área do corpo de prova, altura (L), teor de umidade (H), peso específico seco (Y_s), peso específico

natural (Y_n) e condutividade hidráulica (K).

Porcentagem m de Areias	h1 (m)	h2 (m)	Q (L/seg.)	Área (m ²)	L (m)	h	Y_n (g/cm ³)	Y_s (g/cm ³)	K (m/s)
70%	0,995	0,205	0,0007778	0,007854	0,07	11,32%	18,114	20,203	9.40E-06
60%	0,998	0,209	9.52E-01	0,007854	0,07	8,87%	17,280	19,496	6.35E-06
50%	0,925	0,230	3.33E-01	0,007854	0,07	9,23%	17,643	20,084	4.28E-06
40%	1,213	0,210	6.67E-01	0,007854	0,07	8,81%	17,690	19,937	1.08E-06

O Gráfico 1 apresenta a condutividade hidráulica (K) em função da porcentagem de areia nos corpos de prova.

Gráfico 1 – Valor comparativo em função da condutividade hidráulica (K) e teor de areia (%).



É possível observar no gráfico que o coeficiente de condutividade hidráulica (K) se eleva em função do teor de areia do solo, desta forma quanto maior o teor de areia do solo maior o coeficiente de permeabilidade, ou seja, o fluido terá mais facilidade de se movimentar entre as partículas levando menos tempo para a água percolar no solo. Fato este que é comprovado pelo elevado coeficiente de determinação apresentado pela equação de regressão linear.

De acordo com LIBARDI (2005, p.160):

“Para duas colunas (filtros) idênticas, mas uma com areia grossa e outra com areia bem fina, o valor de K da primeira deve ser bem maior do que a segunda, isto é, sob condição de saturação, a areia grossa deve conduzir mais facilmente o líquido do que a fina.”

Em solos de característica argilosa composto por pequenas partículas, com isso os níveis de arranjo dos grânulos são mais eficientes para diminuir a percolação da água, principalmente quando compactados. A condutividade hidráulica atua proporcionalmente no índice de vazios que o solo possui, quanto maior o índice, maior a facilidade da água fluir através do terreno, uma característica dos solos arenosos. Segundo Pinto (2013, p.113) a água ocupa a maior parte ou a totalidade dos vazios do solo, sendo essa submetida a diferenças de potenciais, a água desloca-se no seu interior.

Millar (1974, p.124) efetuou testes de condutividade hidráulica em solos de característica arenoso, franco, arenoso, franco e franco argiloso. Seus resultados apresentaram uma variação nos coeficientes (K) que foram de 0,2 a 6,0 m/dia ($2,31 \times 10^{-6}$ m/s a $6,94 \times 10^{-5}$ m/s) com uma média de 1,7 m/dia ($1,97 \times 10^{-5}$ m/s).

Hazen criou-se uma fórmula estatística e apresentou dados de condutividade hidráulica, os valores são apresentados na Tabela 3. Estes valores são aplicados para solos arenosos e areias, lembrando que a equação é aproximada podendo variar com algumas características, porém a proporcionalidade é bem consistente (PINTO, 2013, p.117).

Na equação de Hazen demonstrado abaixo, o diâmetro (D) é expresso em cm e o D_{efet} é o diâmetro efetivo do solo. Abaixo a tabela representada por Hazen para solos sedimentares, com

ordem de grandeza:

$$K = 100D_{\text{efet}}^2$$

Tabela 3: Valores típicos de coeficiente de permeabilidade.

Argilas	$<10^{-9}$ m/s
Siltes	10^{-6} a 10^{-9} m/s
Areias argilosas	10^{-7} m/s
Areias finas	10^{-5} m/s
Areias médias	10^{-4} m/s
Areias grossas	10^{-3} m/s

Fonte: PINTO (2013, p.117).

O resultado de condutividade hidráulica deste experimento apresentou uma variação de $1,076 \times 10^{-6}$ m/s à $9,402 \times 10^{-6}$ m/s. De acordo com a tabela apresentada por Hazen, de forma empírica, o solo estudado é condizente com Siltes/Areias argilosas.

De acordo com os resultados da pesquisa apresentados por Augustín e Millar e correlacionando com a tabela de classificação dos solos criado por Hezen, os resultados de permeabilidade do solo analisado no artigo, foram semelhantes aos de Millar, tendo assim resultados plausíveis de acordo com a classificação do solo.

4 CONCLUSÃO

Conclui-se que o teor de areia inseridos no solo interfere diretamente na sua permeabilidade, facilitando a percolação da água nos vazios do solo, desta forma, quanto maior o teor de areia no solo, maior será o coeficiente de permeabilidade do solo.

5 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante.** Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável.** Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostra de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, p.7-9, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação.** Rio de Janeiro, 1986.

GONÇALVES, A. D. M. de A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1174-1184, 2013.

LIBARDI, P. L. **Determinação da condutância hidráulica e da pressão de borbulhamento de cápsulas porosas para tensiômetros.** Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1999.

LIBARDI, Paulo L. **Dinâmica da Água no Solo.** V.61, São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005.

MILLAR, A.A. **Drenagem de terras agrícolas: bases agronômicas.** Bib. Orton IICA / CATIE, 1974.

PINTO, C.S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** 3.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

SILVA, C. L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa e Agropecuária Brasileira**, v. 32, p. 213-220, 1997.