



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – SOLOS E NUTRIÇÃO  
DE PLANTAS

FRANCISCA GLEICIANE DA SILVA

CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO E FLUXO  
PREFERENCIAL EM AMOSTRAS CONFINADAS DE TERRA

FORTALEZA

2015

FRANCISCA GLEICIANE DA SILVA

CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO E FLUXO  
PREFERENCIAL EM AMOSTRAS CONFINADAS DE TERRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre. Área de concentração: Manejo de Solo e Água.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior.

FORTALEZA

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

- 
- S58c Silva, Francisca Gleiciane da.  
Condutividade hidráulica do solo saturado e fluxo preferencial em amostras confinadas de terra /  
Francisca Gleiciane da Silva. – 2015.  
63 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias,  
Departamento de Ciência de Solo, Pós-Graduação em Agronomia, Fortaleza, 2015.  
Área de concentração: Manejo de Solo e Água.  
Orientação: Prof. Dr. Raimundo Nonato Assis Júnior.
1. Condutividade hidráulica. 2. Solos - manejo. I. Título.

CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO E FLUXO  
PREFERENCIAL EM AMOSTRAS CONFINADAS DE TERRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre. Área de concentração: Manejo de Solo e Água.

Aprovado em: 10/07/2015.

**BANCA EXAMINADORA**



---

Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)



---

Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota  
Universidade Federal do Ceará (UFC)



---

Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida  
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

A Deus pelo seu infinito amor

À minha mãe Maria de Lourdes da Silva,  
a quem devo tudo, por todos os seus  
esforços para que eu chegasse até aqui.

Aos meus irmãos Gledson e João Paulo.

À minha avó Maria do Socorro, pelos  
ensinamentos essenciais durante a minha  
formação.

**Dedico.**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, por ser meu alicerce e meu o refúgio, fortalecendo-me em todos os momentos, e por me ajudar a concluir mais uma etapa da minha vida profissional;

À minha mãe Maria de Lourdes da Silva, por toda dedicação, pelo amor, incentivo, carinho e ajuda durante todo esse tempo; dedico toda e qualquer conquista na minha vida a ela, pelo exemplo de mulher e de mãe, meu muito obrigado por tudo;

Aos meus irmãos Gledson e João Paulo que estiveram comigo fazendo todo o possível para a concretização dessa etapa profissional e pessoal;

À minha avó Maria do Socorro pelo amor, por ser a base da minha família;

Aos meus sobrinhos Ângelo, Marianny, Gabriela e Andrezza pelo amor sublime, por ser o motivo da minha alegria, e por depositar em mim um carinho tão grande.

As minhas tias Simone e Denisa, pelo carinho e por estarem sempre torcendo por mim.

A Raul pelo amor, companheirismo, paciência, por estar ao meu lado me fazendo acreditar que a realização dos meus sonhos só depende da minha capacidade de acreditar neles;

À Universidade Federal do Ceará e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Solos e Nutrição de Plantas, pela oportunidade de realização do mestrado;

À FUNCAP – Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão da bolsa durante o período de estudo;

Ao Prof. Raimundo Nonato Assis Júnior, pela orientação, pelos valiosos ensinamentos, por sempre lembrar que o conhecimento é generalista, por despertar em mim o interesse pela essência da ciência e pelo exemplo de dedicação profissional;

Ao Prof. Jaedson Cláudio Anunciato Mota, por toda atenção, pelo exemplo de profissionalismo, e por todas as vezes que se disponibilizou a me ajudar sem nunca hesitar em passar os seus conhecimentos, meus agradecimentos.

A Maria da Saúde Ribeiro, Ademir, Alcione Guimarães, Thiago Leite, Carlos Levi, pelo auxílio em análises de laboratório

A Isabel Cristina por todo apoio durante o processamento dos dados, e por todo incentivo.

Aos discentes e docentes do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, pelos conhecimentos e experiências trocadas durante as disciplinas cursadas.

Aos colegas do curso de mestrado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas da UFC (2013.2), André, Cillas, Kaio, Janete, Tibério, Crisanto e Josimar, pela amizade, companheirismo e troca de experiência durante todo o período do curso.

Às minhas amigas Rayana Costa, Clara Gois, Beatriz Letícia, Ticiane Fontelles, Maria do Rosário, Carla Daniele, Arilene Franklin pela amizade verdadeira e por estarem sempre comigo, e a Maria da Saúde, Maryjane e Kadson pela irmandade que tivemos no exercício diário da convivência durante a minha estada em Fortaleza.

A todos que de alguma forma contribuíram para concretização desse trabalho

Muito obrigada!

“Todo conhecimento começa com o sonho.

O sonho nada mais é que a aventura pelo mar desconhecido, em busca da terra sonhada. Mas sonhar é coisa que não se ensina, brota das profundezas do corpo, como a alegria brota das profundezas da terra. Como mestre só posso então lhe dizer uma coisa. Contem-me os seus sonhos para que sonhemos juntos.”

Rubem Alves.

## RESUMO

A compreensão dos processos relacionados ao movimento da água no perfil do solo é relevante para o manejo do solo e dos recursos hídricos. A condutividade hidráulica é um importante atributo do solo que interfere nesse movimento, sendo que sua determinação na condição de laboratório requer que as amostras estejam confinadas em cilindros, o que pode causar a presença de fluxo preferencial pela interface solo/parede do cilindro. Objetivou-se nesse trabalho testar o efeito do aumento do perímetro e da altura da amostra sobre a condutividade hidráulica do solo saturado em amostras confinadas de terra de diferentes texturas. Foram coletadas amostras de terra para realização das análises físicas, a saber: densidade de partículas, granulometria, argila dispersa em água, porosidade do solo e condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ). Os dados experimentais foram analisados em delineamento inteiramente casualizado para todas as variáveis, adotando-se o esquema fatorial 4 x 5 (quatro diâmetros e cinco alturas dos cilindros), com seis repetições. Foram aplicados os testes de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade dos dados, o F para análise de variância e o de Tukey para a comparação das médias (todos a 5% de probabilidade). Também foi empregada a estatística descritiva clássica para algumas variáveis e técnicas multivariadas de análises. Conclui-se que a) aceita-se a hipótese de que o aumento do perímetro da amostra provoca aumento nos valores de condutividade hidráulica do solo saturado; b) para o mesmo aumento de área de fluxo preferencial, o efeito sobre a condutividade hidráulica do solo saturado para o solo argiloso foi maior; c) a hipótese de que o aumento do percurso da água causa alteração nos valores de  $K_0$  foi refutada; d) para ambas as classes de solos o aumento do percurso da água não foi determinante nos valores obtidos para condutividade hidráulica do solo saturado.

**Palavras-chave:** Movimento de água, permeâmetro de carga constante, perímetro da amostra.

## ABSTRACT

Understanding the processes related to the movement of water in soil profile is relevant to the management of soil and water resources. Hydraulic conductivity is an important soil property that affects this movement, but its determination in laboratory conditions requires that samples are contained in cylinders which can cause the presence of preferential flow through the soil wall interface. So, the goal of this work was to test the effect of increasing perimeter and height of the sample on saturated hydraulic conductivity in confined soil samples of different textures. Soil samples were collected and the following physical analyzes were performed: particle density, particle-size, water dispersed clay, soil porosity, and saturated hydraulic conductivity ( $K_o$ ). Experimental data were analyzed in a randomized design for all variables, adopting a 4 x 5 factorial arrangement (four diameters x five heights of the cylinders), with six replications. The Shapiro- Wilk test was used to verify the normality of the data, F test for analysis of variance, and Tukey's test for comparison of means ( $p < 0.05$ ). Classical descriptive statistics and multivariate analysis techniques were also employed. It was conclude that: a) the results support the hypothesis that the increase of the perimeter causes an increase of the saturated hydraulic conductivity; b) for the same increase of preferential flow area, the effect on the saturated hydraulic conductivity was higher for clay soil; c) the hypothesis that increased water path causes a change in the  $K_o$  values was rejected; d) for both soil classes increased water path did not affect the values of the saturated hydraulic conductivity.

**Keywords:** water movement; constant loading permeameter; sample perimeter.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Permeâmetro de carga constante.....	25
Figura 2 - Trincheira utilizada para retirada das amostras de terra .....	28
Figura 3 - Etapas para a confecção dos cilindros .....	29
Figura 4 - Cilindros e preparo do corpo de prova.....	31
Figura 5 - Etapas da análise granulométrica .....	32
Figura 6 - Etapas para determinação da macro e microporosidade .....	34
Figura 7 - Método do permeâmetro de carga constante .....	34
Gráfico 1 - Dispersão dos atributos físicos, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e condutividade hidráulica do solo saturado, obtidos em amostras de volumes variados mediante a combinação de diferentes diâmetros e alturas.....	50
Gráfico 2 - Condutividade hidráulica do solo saturado em amostras de volumes variados em função variações nos diâmetro e alturas dos cilindros. Gráficos (A) e (B) representação para as classes texturais argilosa e arenosa, respectivamente.....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Esquema das combinações para a confecção dos cilindros. Ø Diâmetro do PVC (cm); h Altura do PVC (cm), e os respectivos valores de perímetro, área e volume.....	29
Tabela 2 - Características físicas do solo (granulometria, argila natural, grau de flocculação, classe textural) .....	32
Tabela 3 - Densidades do solo pré-estabelecidas, densidades de partículas medidas e porosidade total calculada para as duas amostras de terra utilizadas no experimento.....	38
Tabela 4 - Densidade do solo ( $\rho_s$ ) e porosidade total do solo ( $\alpha$ ), após determinação da condutividade hidráulica do solo saturado .....	41
Tabela 5 - Valores médios para a microporosidade e macroporosidade do solo argiloso.....	43
Tabela 6 - Valores médios para a microporosidade e macroporosidade do solo arenoso.....	43
Tabela 7 - Estatística descritiva para volume de poros ( $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ ) para cada classe textural de solo analisado.....	44
Tabela 8 - Autovalores e porcentagem explicada por cada componente para as duas classes de solos estudadas.....	47
Tabela 9 - Correlação entre as variáveis e componentes principais e sua respectiva contribuição para cada componente para o solo argiloso .....	48
Tabela 10 - Matriz de correlação Pearson para o solo argiloso e arenoso.....	50
Tabela 11 - Comparação dos valores médios da raiz da condutividade hidráulica do solo saturado $K_0$ ( $\text{cm h}^{-1}$ ) para todos os tratamentos.....	51

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1 Movimento de água no solo</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2 Condutividade hidráulica em solo saturado</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2.1 Fatores que afetam na condutividade hidráulica em solo saturado</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2.1.1 Textura e estrutura do solo</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2.1.2 Porosidade</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2.1.3 Densidade do solo</b> .....	<b>22</b>
<b>2.2.1.4 Fluxo preferencial</b> .....	<b>22</b>
<b>2.3 Permeâmetro de carga constante</b> .....	<b>25</b>
<b>2.3.1 Limitações ao uso</b> .....	<b>26</b>
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>28</b>
<b>3.1 Coleta de terra para o preparo do corpo de prova</b> .....	<b>28</b>
<b>3.2 Confecção dos cilindros</b> .....	<b>28</b>
<b>3.3 Construção do corpo de prova</b> .....	<b>30</b>
<b>3.5 Análises físicas para caracterização do solo</b> .....	<b>31</b>
<b>3.5.1 Densidade de partículas</b> .....	<b>31</b>
<b>3.5.2 Granulometria</b> .....	<b>31</b>
<b>3.5.3 Argila dispersa em água</b> .....	<b>32</b>
<b>3.5.4 Porosidade</b> .....	<b>33</b>
<b>3.4. Condutividade hidráulica do solo saturado</b> .....	<b>34</b>
<b>3.5. Correção da massa de solo</b> .....	<b>35</b>
<b>3.6 Delineamentos e Análise dos dados</b> .....	<b>36</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>38</b>
<b>4.1. Densidade do solo e porosidade total</b> .....	<b>38</b>
<b>4.1.1. Densidade do solo e porosidade total obtidas nos corpos de prova</b> .....	<b>39</b>
<b>4.2. Microporosidade e macroporidade</b> .....	<b>41</b>
<b>4.5 Análise Multivariada</b> .....	<b>46</b>
<b>4.6 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO</b> .....	<b>51</b>
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIA</b> .....	<b>56</b>

APÊNDICES .....	63
-----------------	----

## 1 INTRODUÇÃO

As interações que ocorrem entre a água e o solo estão diretamente relacionadas ao desenvolvimento e produtividade das culturas; assim é indispensável conhecer e caracterizar adequadamente o comportamento hidrodinâmico do solo, uma vez que a determinação da quantidade de água necessária para as plantas constitui-se como um dos principais parâmetros para a tomada de decisões referentes à exploração agrícola do solo e manejo dos recursos hídricos.

A demanda transpirativa das plantas é dependente das condições atmosféricas; essa demanda deve ser atendida pela densidade de fluxo de água no solo, para que não haja déficit de água na planta. Para o entendimento do processo de fluxo de água no solo se faz necessário conhecer as características do solo que nele interferem, dentre os quais se destaca a condutividade hidráulica, a qual está diretamente relacionada com características do solo como textura, estrutura e geometria dos poros, bem como com a fluidez da água.

A medição da condutividade hidráulica em meios porosos saturados pode ser feita tanto na condição de campo quanto em laboratório, sendo a condição de laboratório mais comumente utilizada, para a qual vários métodos estão disponíveis, cada um podendo assumir resultados distintos a depender dos pressupostos assumidos. A condição comum a muitos deles é a necessidade de que amostras confinadas em cilindros sejam coletadas; por esse motivo aventa-se a possibilidade de fluxo preferencial entre o solo e a parede do cilindro, o que pode ocasionar conclusões errôneas a respeito do seu valor e com isso influenciar diretamente na tomada de decisões da escolha do manejo agrícola da água e do solo, haja vista que, em tendo isso ocorrido, o fluxo não se deu apenas pela matriz do solo.

Amostras de maiores tamanhos são consideradas mais adequadas em análises dessa natureza, pois possibilita informações mais relevantes sobre o comportamento do solo, visto diminuir a variabilidade espacial dos dados. Duas possibilidades de se aumentar o tamanho da amostra é pelo aumento da altura ou do diâmetro dela. Com o aumento do diâmetro ocorrerá, concomitantemente, aumento no perímetro do contato amostra-cilindro, aumentando a possibilidade do fluxo preferencial.

Nesse contexto o trabalho partiu das seguintes hipóteses: 1) o aumento do perímetro da amostra provoca aumento no valor da condutividade hidráulica em amostras

confinadas de terra; 2) esse aumento é muito mais pronunciado em solos argilosos; 3) o aumento do percurso do fluxo da água também causa alteração da condutividade hidráulica saturada; e 4) esse efeito é mais predominante em solos argilosos. Considerando tais hipóteses, esse trabalho teve como objetivo testar o efeito do aumento do perímetro da amostra e do percurso da água sobre a condutividade hidráulica do solo saturado em amostras confinadas de terra de diferentes texturas.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Movimento de água no solo

Conhecer o estado energético da água no solo é pertinente quando se deseja relacionar o fluxo de água no solo com processos como irrigação e drenagem (MESQUITA; MORAES, 2004). Segundo Klar (1988), o movimento de água no solo é uma resposta aos gradientes de potenciais hidráulicos. Toda vez que no sistema em consideração houver diferença de potencial entre dois pontos uma força é criada e a água pode então se movimentar do ponto de maior energia para o de menor energia. Caso contrário, quando não há variação entre pontos de um sistema com relação ao potencial total, ou seja, gradiente total igual à zero, a água encontra-se em equilíbrio (REICHARDT, 1990).

O primeiro a estabelecer uma equação que permitisse quantificar o movimento de água em materiais porosos foi Darcy (1856), constatando que a densidade de fluxo é proporcional ao gradiente de potencial hidráulico no solo (REICHARDT; TIMM, 2012). Como o gradiente de potencial equivale à força por volume, admite-se que o fluxo de água no solo é dado pela resultante de uma força que atua sobre um volume de água, correspondendo ao gradiente de potencial, com direção e sentido definidos (BIASSUSI, 2001).

O potencial total no sistema solo-planta-atmosfera pode então ser descrito como o somatório dos componentes gravitacional, de pressão, matricial e osmótica (Eq. 1), sendo o último, para a maioria dos estudos, considerado desprezível. Não obstante, ele torna-se importante quando da presença de membranas semipermeáveis que se encontram nas células das plantas e nas interfaces água-ar, as quais permitem a passagem de água, mas não dos solutos, ou quando a concentração salina é significativa (REICHARDT, 1996). Se aceita, ainda, que podem existir outros potenciais ou formas de energia, porém para o estudo da água no solo são considerados insignificantes (AMARO FILHO; ASSIS JÚNIOR; MOTA, 2008).

$$\Psi_t = \Psi_g + \Psi_p + \Psi_m + \Psi_{os} \dots \quad \text{Eq. (1)}$$

## 2.2 Condutividade hidráulica em solo saturado

A interação solo-água, a qual influencia no desenvolvimento e produtividade das culturas, é dependente de propriedades da água e do solo; entre as propriedades do solo está a condutividade hidráulica (CARVALHO, 2002), relacionada com a eficiência no transporte de água e solutos (PAULETTO, 1986; MORAES *et al.*, 2003), com os impactos potenciais ao ambiente (HURTADO; CICHOTA; VAN LIER, 2005) e cujo valor é utilizado nos cálculos de fluxo no solo (MESQUITA; MORAES, 2004).

O conceito de condutividade hidráulica foi primeiramente aplicado pelo engenheiro hidráulico Henry Darcy no século XIX, no ano de 1856, quando ele realizou um experimento sobre fluxo vertical de solução em filtros (colunas) de areia homogênea sob condição de saturação (LIBARDI, 2005), estabelecendo que a quantidade de água que passa por unidade de tempo e de área de secção transversal através de um meio poroso é proporcional ao gradiente de potencial total de água. Essa constante de proporcionalidade ficou então denominada de condutividade hidráulica, expressa com sendo a facilidade com que a água se movimenta no solo.

A condutividade hidráulica ( $K$ ) pode ser representada pela função  $K(\Theta)$ , em que  $\Theta$  é a umidade volumétrica do solo, que traduz o quanto o solo conduz de água em uma dada umidade (KLEIN; LIBARDI, 2002). Portanto, para um dado solo, a condutividade hidráulica ( $K$ ) é tanto maior quanto maior for sua umidade ( $\Theta$ ), atingindo seu valor máximo, segundo Reichardt (1990), quando o solo encontra-se em condição de saturação, em que todos os poros estão preenchidos por água. Nessa condição, afirma Reichardt (1975), os fenômenos de capilaridade e adsorção são nulos, e assim também o é o potencial mátrico. Nessa condição, para efeito de energia total da água no solo são importantes os potenciais de pressão e gravitacional (esse apenas para fluxo vertical).

A condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ) é considerada uma das propriedades do solo de maior importância, uma vez que serve de parâmetro para o correto manejo da água no solo, além de fornecer informações indiretas da estrutura e da estabilidade estrutural do solo (Klute, 1965). Mediante sua relevância, deve ser dada muita atenção para a sua correta determinação já que decisões são tomadas a partir do seu conhecimento (MESQUITA; MORAES, 2004).

Para a determinação da condutividade hidráulica em solo saturado existem vários métodos, com diferentes níveis de precisão, sendo o uso de um ou outro dependente

das condições e dos objetivos a serem alcançados. Geralmente são divididos em métodos diretos e indiretos (MARQUES *et al.*, 2008).

Os métodos indiretos relacionam a condutividade hidráulica com propriedades do solo (distribuição do tamanho dos poros, textura, porosidade drenável, densidade do solo etc.). No entanto, Amaro Filho, Assis Júnior e Mota (2008) relatam que experiências têm mostrado que esta correlação é mais adequada para solo com baixos valores de condutividade hidráulica.

Já os métodos diretos de medida da condutividade hidráulica em solo saturado podem ser aplicados tanto em condições de laboratório quanto em campo (MARQUES *et al.*, 2008). Dentre as formas mais comuns de medir ( $K_o$ ) por métodos diretos em laboratório destacam-se o do permeâmetro de carga constante e do permeâmetro de carga decrescente (LIBARDI, 2005). Para Millar (1988), esses métodos são mais adequados quando objetivo é estudar a influência de fatores como textura, estrutura e salinidade no movimento da água no solo.

Problemas associados com a determinação de  $K_o$ , *in situ*, ou em laboratório, que requerem a utilização de colunas com amostras de solo com estrutura indeformada, são principalmente a sua alta variabilidade espacial (Russo e Bresler, 1981; Lauren *et al.*, 1988; Mohanty *et al.*, 1994a). Diante disso, é maior a necessidade de se obedecer a critérios de amostragem, pois o rigor nesse procedimento pode evitar a compactação e formação de fissuras no solo, haja vista poderem ocasionar a percolação do fluido por fluxo preferencial (SILVA 2014; TREVISAN *et al.*, 2009). Amaro Filho *et al.* (2007) ressaltam que os atributos físicos e químicos do solo, por mais uniforme que o solo se apresente, normalmente exibem variações, mesmo para uma mesma classe de solo, existindo uma variação espacial para alguns atributos em curtas distâncias, e isso pode interferir no comportamento do solo. De acordo Backer e Bouma, (1976) e Lauren *et al.* (1988), conforme o volume amostrado aumenta a variabilidade de  $K_o$  tende a diminuir, pois ocorre uma maior consolidação das características do solo dentro da amostra.

Mesquita e Moraes (2004) afirmam que para caracterizar um solo quanto à sua condutividade hidráulica quando saturada são demandadas muitas medidas, por causa da variabilidade espacial decorrente das alterações contínuas nos processos físicos, químicos e biológicos e que elevam o coeficiente de variação, quando comparado com propriedades do solo como porosidade total, macro e microporosidade e densidade do solo. A variabilidade espacial é, assim, uma das principais dificuldades na obtenção de amostras

representativas de grandes áreas, interferindo diretamente nos valores médios obtidos (CADIMA *et al.*,1980).

## **2.2.1 Fatores que afetam na condutividade hidráulica em solo saturado**

### ***2.2.1.1 Textura e estrutura do solo***

Segundo Hillel (1980) e Foth (1987), os solos que apresentam textura arenosa têm tendência a serem menos porosos que os solos de textura fina, entretanto, o tamanho médio individual dos poros é maior em solos de textura arenosa. A granulometria é representada pela distribuição percentual da argila, silte e areia, e é considerada por alguns autores como a característica física mais estável e importante do solo, uma vez que propriedades do solo são correlacionadas com ela. Solos com classes texturais diferentes apresentam coeficientes de variação e ordem de grandezas distintas entre valores de condutividade hidráulica em solo saturado, o que confirma a elevada variabilidade, o que também indica que a utilização desta propriedade deve ser feita com critério, principalmente quando conclusões são feitas a partir dela (MESQUITA *et al.*, 2004).

A textura do solo é uma característica pouco afetada pelo manejo, pouco variável no tempo e tem influência indireta sobre o fluxo de água no solo na medida em que a estrutura do solo é afetada. Dessa forma, Mesquita *et al.* (2004) afirmam que a condutividade hidráulica do solo saturado se faz mais dependente das alterações associadas à estrutura do que à textura do solo, uma vez que a distribuição de tamanhos de poros, bem como da forma e continuidades deles, influenciam mais expressivamente a movimentação da água no solo. Práticas culturais adotadas que alteram a estrutura afetam a condutividade hidráulica, mais até do que os processos de gênese do solo.

### ***2.2.1.2 Porosidade***

A porosidade total do solo corresponde ao espaço de vazios totais ocupados pelo ar e pela solução do solo, ou seja, é a relação existente entre o volume de vazios e volume total do solo (KIEHL 1979).

Os espaços porosos existentes entre as partículas, ou mesmo entre agregados, provenientes do arranjo, distribuição e orientação das partículas no solo, são responsáveis

por armazenar água e ar necessários para o crescimento e desenvolvimento das plantas, microorganismos e animais do solo (MICHELON 2005). A porosidade total do solo pode ser dividida, segundo Koorevaar *et al.* (1983) citado por Libardi (2005), em três grupos: *macroporos*: poros com diâmetro maior que 100  $\mu\text{m}$ , *mesoporos*: poros com diâmetro entre 30 e 100  $\mu\text{m}$ , *microporos*: poros com diâmetro menor que 30  $\mu\text{m}$ . Já que a água escoar pelos espaços porosos do solo, a distribuição dos tamanhos dos poros é uma das características mais importantes, dentre os atributos do solo que interferem na condutividade hidráulica em solo saturado. Borges *et al.* (1999) ressaltam a importância de considerar os macroporos, devido estes serem mais funcionais quando o solo está próximo à saturação, sendo capazes de transportes preferências de fluidos. Bouma (1982) também relata essa influência, em razão da facilidade que redes de macroporos propicia ao movimento descendente mais rápido de água e de solutos à maiores profundidades, proporcionando o desvio de significativa parte da matriz do solo. Segundo Mohanty *et al.* (1994a), quando amostras de pequenas dimensões são utilizadas para as medições da condutividade hidráulica do solo saturado os macroporos têm a propensão de aumentar a variabilidade.

A porosidade do solo na avaliação do estado da integridade da estrutura do solo e sua correlação entre os estudos dos efeitos da compactação do solo e na produtividade vegetal dentre as relações de massa-volume é a que apresenta maior importância (HILLEL, 1998).

Ellies *et al.* (1997) relatam que características como quantidade, tamanho, morfologia, continuidade e orientação dos poros, por descreverem a funcionalidade do sistema poroso, e a condutividade hidráulica, por ser dependente dessas, estão fortemente associados. No entanto, Mesquita e Moraes (2004) alertam sobre erros que podem surgir quando se relacionam propriedades físicas que são frequentemente utilizadas para descrever a condutividade hidráulica do solo saturado, como a densidade do solo, macro, meso e microporosidade e porosidade total, por não serem obtidas diretamente a partir de correlação e sim com a utilização de modelos.

Dexter *et al.* (2004), avaliando o efeito da estrutura na condutividade hidráulica em solo saturado, constataram que altos valores foram relacionados com a presença de mesoporos formados por raízes e minhocas, mesmo esta sendo altamente dependente da macroporosidade, já que os maiores valores de condutividade hidráulica são encontrados juntamente com os maiores valores de porosidade. Bouma (1982) relata que poros

pequenos podem conduzir maior quantidade de fluido quando se encontram de forma contínua, enquanto poros maiores, mas que apresentam descontinuidade no solo, podem não contribuir para o fluxo.

Diante dessas considerações, processos naturais ou antropogênicos que venham a modificar a estrutura do solo podem influenciar diretamente a condutividade hidráulica em solo saturado, uma vez que esta é uma propriedade dinâmica sujeita a modificações decorrentes no meio poroso.

### **2.2.1.3 Densidade do solo**

A densidade do solo é definida como sendo a razão existente entre a massa de uma amostra de solo seca a 105°C e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e pelos espaços porosos do solo (KIEHL, 1979).

De acordo Klein (2008), a densidade dos solos varia com a textura e com o teor de matéria orgânica e que, para a maioria dos solos agrícolas, os valores variam de 0,9 a 1,8 g cm<sup>-3</sup>. Valores críticos de densidade do solo foram propostos por Reinert *et al.* (2001), sendo da ordem de 1,45 g cm<sup>-3</sup> para solos com mais de 55% de argila, 1,55 g cm<sup>-3</sup> para solos com teor de argila entre 20 e 55% de argila e 1,65 g cm<sup>-3</sup> para solos com menos de 20% de argila.

Na determinação da condutividade hidráulica do solo saturado, a densidade pode influenciar diretamente, visto a relação inversa existente entre a densidade do solo e porosidade total (ANJOS *et al.*,1994; VEIGA *et al.*,1994), e sendo a condutividade hidráulica altamente dependente do sistema poroso, há, com o aumento na densidade, uma diminuição na permissão do solo à passagem de água. No entanto, vale salientar que mesmo sendo habitualmente apresentados na literatura valores críticos de densidade do solo, este quando referente ao crescimento radicular, não é o mesmo para diferentes tipos de solos e plantas.

### **2.2.1.4 Fluxo preferencial**

Compreender os processos complexos que regem os mecanismos de fluxo de água no solo em condições saturadas e insaturadas apresenta-se muito relevante em estudos que tratam da dinâmica da água no solo. Esses mecanismos podem ser

influenciados por alguns processos. Dentre eles destaca-se o fluxo preferencial, processo no qual em algumas condições a água se move através do perfil ou amostras de solo, ao longo de caminhos preferenciais sem que haja a interação desta com a matriz do solo (EGUCHI; HASEGANA, 2008).

Fluxo preferencial está diretamente relacionado com condições físicas do solo (ALLAIRE *et al.*, 2009) e pode ocorrer por processos tais como: fluxos em rachaduras ao longo de uma coluna de solo, especialmente em solos com teor de argila significativo (HENDRICKX; FLURY, 2001), fluxos causados pela presença de bio-poros oriundos da fauna do solo (ZEHE; FLÜHLER, 2001), fluxo através de fingers, que ocorre devido ao acúmulo de água na interface entre duas camadas de solo (REZANEZHAD *et al.*, 2006) e fluxo lateral, que ocorre em solos que apresentam uma camada hidraulicamente restritiva ou quando da presença de raízes laterais (McDONNELL, 1990).

A passagem preferencial de fluxo não ocorre apenas através destas grandes passagens anteriormente citadas, mas, também, devido às características da própria matriz do solo que podem apresentar heterogeneidade hidráulica macroscópica ou até mesmo hidrofobicidade (EGUCHI; HASEGANA, 2008).

Segundo Wang *et al.* (2003), durante muito tempo considerou-se que o fluxo preferencial era causado apenas por fissuras ou fendas em solos bem estruturados ou pelos caminhos deixados pelas minhocas ou raízes. No entanto, nas últimas décadas é significativo o número de pesquisas voltadas para examinar os caminhos preferenciais de transporte de água e solutos, que apresentam resultado confrontantes com essa ideia (SIMPSON E CUNNINGHAM, 1982, GHODRATI e JÚRY, 1990; DEEKS *et al.*, 1999) para uma grande variedade de solos (FORRER *et al.*, 2000; DROOGERS *et al.*, 1998) em condições tanto de campo quanto em laboratório (AEBY *et al.*, 1997; DEEKS *et al.*, 1999). A depender das perguntas a serem respondidas, do tipo específico de fluxo e dos equipamentos e instrumentação disponíveis, vários são os métodos empregadas para este fim (ALLAIRE *et al.*, 2009).

A distribuição de água e contaminantes é frequentemente associada com o movimento da água no perfil ou na superfície do solo (Allaire *et al.*, 2009). Diante disso, algumas técnicas para estimar o fluxo preferencial, baseadas em como é dado esse movimento, foram desenvolvidas, com medidas diretas ou indiretas, e os dados passam por mapeamento utilizando técnicas de interpolação.

Dentre essas técnicas a condutividade hidráulica é usada tanto para as condições de campo quanto de laboratório, sendo que, segundo Reynolds e Elrick (2005), para essas medidas, é feita uma relação indireta com os valores de fluxo preferencial. No entanto, esses métodos, em geral, carecem de uma condição de não saturação, já que há necessidade do solo estar sob tensão variável para estimativa do fluxo na matriz, em que esta tensão é obtida geralmente com a utilização de equipamentos como infiltrômetro de tensão.

De acordo com Bouma (1982) e Mooney *et al.*, (2000), os estudos de fluxo preferencial em campo são regra e não exceção. Kung; Ghodrati; Júri (1992) observaram, em estudo feito em campo, que os chamados solos mal estruturados têm mostrado um forte potencial para manifestar fluxo preferencial.

Já os estudos voltados para determinação do fluxo preferencial em laboratório apresentam limitações, pela dificuldade na obtenção das amostras de solos. Desse modo o mais requerido para este caso seria amostras de solo com estrutura preservada, em que as mesmas sejam de tamanho suficiente para contemplar a heterogeneidade espacial e representem fielmente os processos de fluxo na condição de campo (BEAR, 1972).

Dada a dificuldade em prever a circulação de massa (sólidos, líquidos e gases), tanto em condição de campo quanto de laboratório, estudos que tratam de movimento que não o esperado pelas características intrínsecas da matriz do solo (de ROOIJ, 2000, LIN e ZHOU, 2008; JAMIESON *et al.*, 2002 ) são muito pertinentes, uma vez que a passagem de água, de fertilizantes e de outros produtos agroquímicos por caminhos que não pelos poros do solo podem aumentar os riscos de problemas ambientais tais como a poluição de águas subterrâneas e diminuir a eficiência do uso da água (JARVIS, 2007).

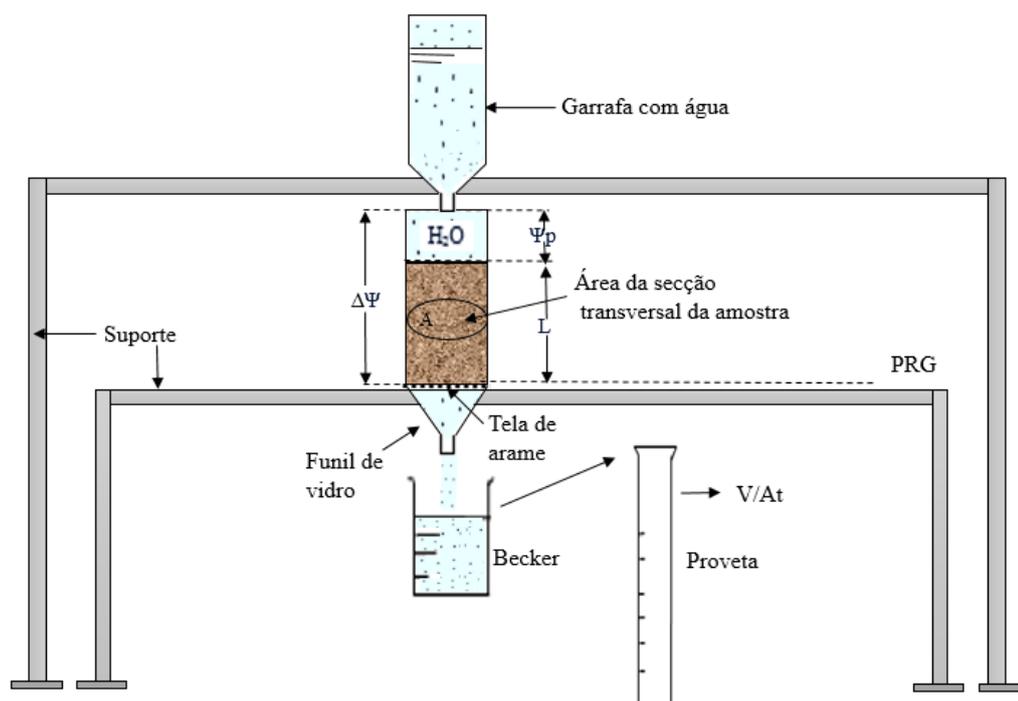
Para o estudo da condutividade hidráulica do solo saturado, a preocupação com a presença de fluxo preferencial se dá devido ao seu impacto durante o processo de medição, pois determinações em laboratório que utilizam amostras confinadas de solo, a presença de fluxo preferencial pode causar uma superestimativa dos valores observados e com isso introduzir erros, se comparado com valores medidos diretamente no campo (MAHESHWARI, 1997). Visto que  $K_o$  é utilizado como um parâmetro hídrico para a caracterização de solos, surgem então alguns questionamentos, dentre eles: em que proporção os métodos utilizados em laboratório para obtenção dos valores de  $K_o$  são confiáveis? Poucas são as informações existentes na literatura sobre como se dá esse

caminho preferencial de fluxo para essa condição, bem como da possibilidade de utilizar esses métodos para fazer prospecções sobre a sua quantificação.

### 2.3 Permeâmetro de carga constante

Na determinação da condutividade hidráulica do solo saturado, em laboratório, o método do permeâmetro de carga constante é o mais empregado. O mesmo consiste, de acordo com Amaro Filho, Assis Júnior e Mota (2008), em se obter um bloco (amostra) de solo com estrutura preservada, em que a  $K_0$  é determinada medindo-se a quantidade de água que atravessa, em determinado tempo  $t$ , a área de secção transversal  $A$  da amostra (figura 1).

Figura1. Esquema do Permeâmetro de carga constante



Fonte: Autor.

Segundo Libardi (2005), o método é a própria experiência de Darcy e deve ser utilizado quando amostras com estrutura preservada são necessárias. No entanto, o mesmo ressalta que este é mais adequado para amostras com valores de condutividade maiores que  $2 \cdot 10^{-3} \text{ mm s}^{-1}$ .

Pimenta (1991) afirma que estudos em laboratório têm a vantagem de permitir maior controle do ambiente; contudo, há a desvantagem de não se poder relacionar diretamente com os dados obtidos *in situ* e estas por sua vez, refletem as condições reais presentes no campo, mas demandam mais tempo para a execução dos ensaios, principalmente quando repetições são requeridas para a obtenção de resultados mais confiáveis.

### **2.3.1 Limitações ao uso**

Em métodos cujas amostras utilizadas estão em condição de confinamento, segundo a literatura, há a possibilidade de ocorrer fluxo preferencial causado pela interface do solo com a parede do cilindro, o que pode levar a equívocos sobre o real valor da condutividade hidráulica do solo saturado (MAHESHWARI 1997). Além desse fator, a própria granulometria do solo, ou até mesmo níveis de compactação, pode permitir a passagem de água que não pelos poros do solo.

Conforme Gardner (1986) e Libardi (2005), devido o método do permeâmetro de carga constante ser utilizado para solos que apresentam altos valores  $K_o$ , faz a utilização desse método para a medida da  $K_o$  em solos argilosos um desafio, visto que na condição de saturação os macroporos são mais funcionais, razão pela qual os solos arenosos mostram valores mais elevados de  $K_o$ . Já os solos argilosos, por apresentarem maior quantidade de microporos, poros responsáveis pela retenção de água, dificultam a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado.

Outro fator que pode comprometer os resultados quando são utilizadas amostras com estrutura preservada é o tamanho da coluna de solo. Klute e Dirksen (1986) relatam que métodos que requerem uma longa coluna de solo geralmente não são adequados. Os mesmos afirmam que as dimensões das amostras podem variar; no entanto, estas devem ser maiores que as maiores unidades estruturais no solo, obedecendo a um tamanho tal que não torne a análise impraticável e ao mesmo tempo não seja tão pequeno, devido à alta variabilidade que acomete a condutividade hidráulica do solo, sendo que cilindros de diâmetros da ordem de 2 a 10 cm e comprimento de 5 a 25 cm, são considerados práticos para medições em laboratório.

Quanto ao volume da amostra, para a maioria dos casos o que se encontrados na literatura com o uso do permeâmetro de carga constante, e o uso de amostras com 0,075 m de altura e 0,075 m de diâmetro ( $3,31 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ ).

Mesmo mediante algumas ressalvas, o método do permeâmetro de carga constante é muito difundido na determinação da condutividade hidráulica do solo saturado, por ser um método simples, de fácil execução e por fornecer resultados aproximados aos de campo (KLUTE; DIRKSEN 1986), desde que se tenha a devida atenção no momento de coleta, preparação das amostras, bem como nos procedimentos em laboratório.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Coleta de terra para o preparo do corpo de prova

As amostras de terra com estrutura deformada foram provenientes de um ARGISSOLO AMARELO Eutrocoeso típico, localizado no Setor de Zootecnia da Universidade Federal do Ceará, campus Pici. A trincheira foi selecionada por apresentar as delimitações dos horizontes e com isso facilitar a coleta de materiais de classes texturais diferentes (Figura 2). A coleta das amostras foi realizada em profundidades distintas, sendo que de 0,05 m a 0,9 m foi possível obter o material arenoso e a partir de 1m o material argiloso. Em seguida estas foram devidamente identificadas e encaminhadas para o laboratório de análises físicas da Universidade Federal do Ceará (UFC), onde foram realizadas as análises referentes ao objetivo do estudo.

Figura 2. Trincheira utilizada para retirada das amostras de terra



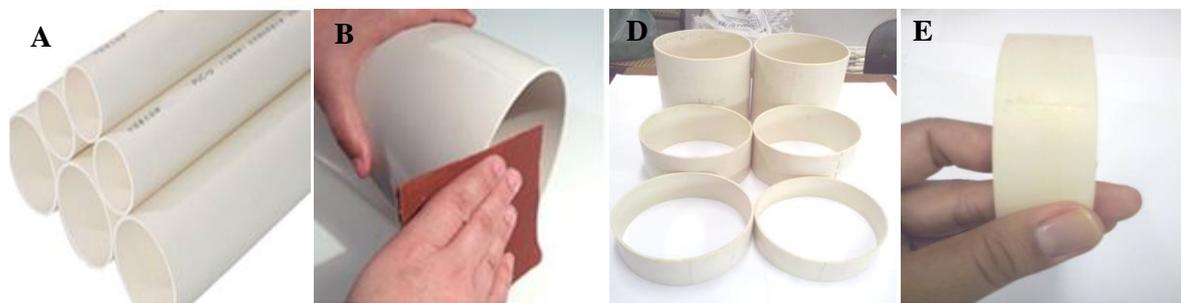
Fonte: Autor

#### 3.2 Confeção dos cilindros

Os cilindros à conter os corpos de prova foram confeccionados em PVC, com diferentes alturas e diâmetros, a fim de se ter diferentes percursos (altura) e perímetros (diâmetros), o que permitiria se testar as hipóteses aventadas. O material foi cuidadosa e minuciosamente manipulado (Figura 3), sendo que os cortes referentes a cada à altura do cilindro foi feito por meio de um torno mecânico. Cilindros de 2,5 cm de altura foram

confeccionados para cada diâmetro, e foram postos na superfície superior de cada corpo de prova durante a realização dos ensaios, com o objetivo de aplicar uma carga de pressão constante sobre as amostras de terra (corpo de prova).

Figura 3. Etapas para confecção dos cilindros



Fonte: Autor

Os diferentes volumes dos corpos de prova, em função dos diâmetros e das alturas, podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 - Esquema das combinações para a confecção dos cilindros.  $\varnothing$ : Diâmetro do PVC (cm); **h**: Altura do PVC (cm), e os respectivos valores de perímetro, área e volume.

$\varnothing$ (cm)	h (cm)	Perímetro (cm)	Área cm <sup>2</sup>	Volume cm <sup>3</sup>
<b>3,2</b>	3,2	10,05	8,04	25,72
	5,0	10,05	8,04	40,19
	7,5	10,05	8,04	60,29
	10	10,05	8,04	80,38
	15	10,05	8,04	120,58
<b>5,0</b>	3,2	15,70	19,63	62,80
	5,0	15,70	19,63	98,13
	7,5	15,70	19,63	147,19
	10	15,70	19,63	196,25
	15	15,70	19,63	294,38
<b>7,5</b>	3,2	23,55	44,16	141,30
	5,0	23,55	44,16	220,78
	7,5	23,55	44,16	331,17
	10	23,55	44,16	441,56
	15	23,55	44,16	662,34
<b>10</b>	3,2	31,40	78,50	251,20
	5,0	31,40	78,50	392,50
	7,5	31,40	78,50	588,75
	10	31,40	78,50	785,00
	15	31,40	78,50	1177,50

### 3.3 Construção do corpo de prova

O objetivo da montagem de corpos de provas foi o de construí-los a todos de modo mais homogêneo possível, com os mesmos valores de densidade do solo e de porosidade total, a fim de que variação na condutividade hidráulica do solo saturado, se ocorresse, fosse consequência apenas da existência de fluxo preferencial, o que permitiria um adequado teste das hipóteses levantadas. Os valores de densidade do solo adotados foram de  $1,2 \text{ g cm}^{-3}$  e  $1,4 \text{ g cm}^{-3}$  para as unidades amostrais compostas por material argiloso e arenoso, respectivamente.

Após a coleta em campo das amostras com estruturas deformadas, o material foi seco ao ar, destorroado e passado em peneira de malha de 2,0 mm de diâmetro, ou seja, terra fina seca ao ar (TFSA). Em seguida, para que fosse possível a montagem dos corpos de prova, adotou-se o procedimento semelhante ao utilizado na determinação da densidade do solo pelo método da proveta (EMBRAPA, 2011). Em função do volume do corpo de prova (Tabela 1) e da densidade previamente definida, determinava-se a massa de solo a ser usada em cada corpo de prova, utilizando-se a Eq. (2). Balança de precisão: 0,00001 foi utilizada nessa etapa.

$$m=d.v \quad \text{Eq. (2)}$$

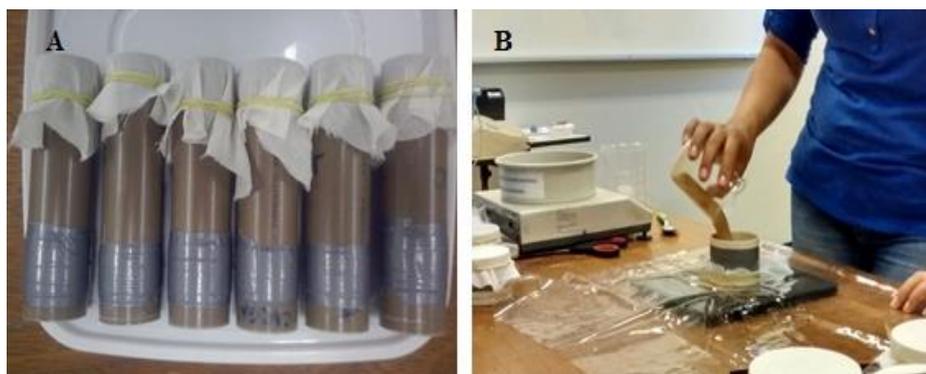
Em que:  $m$ = massa do solo [g];

$d$ = densidade do solo [ $\text{g cm}^{-3}$ ];

$v$ = volume do cilindro [ $\text{cm}^3$ ].

Após pesagem, a TFSA, homogeneizada, era colocado lenta e uniformemente nos cilindros. Uma mesma fração de TFSA era colocada por vez, após o que se promovia batidas do cilindro em uma base de borracha de 5 cm de espessura, com um percurso de queda de 10 cm, a fim de que a força (impacto) exercida fosse a mesma em todas as vezes (Figura 4A e 4B). Tais procedimentos teve como objetivo a construção de um corpo de prova homogêneo em sua totalidade.

Figura 4. Cilindros e preparo do corpo de prova



### 3.5 Análises físicas para caracterização do solo

Após a obtenção da TFSA, subamostras de cada material que compuseram as unidades experimentais foram levadas à estufa a 105° C para a determinação da unidade gravimétrica, a qual é utilizada para calcular o fator “f” que corresponde ao fator de correção utilizado para converter os resultados quando as análises de solo de TFSA para TFSE. Umidade residual e fator “f” são calculados pelas seguintes expressões:

$$\text{Umidade residual (\%)} = [(TFSA - TFSE) / TFSE] * 100 \quad \text{Eq. (3)}$$

$$\text{Fator “f”} = TFSA / TFSE \quad \text{Eq. (4)}$$

Sendo TFSE, terra fina seca em estufa.

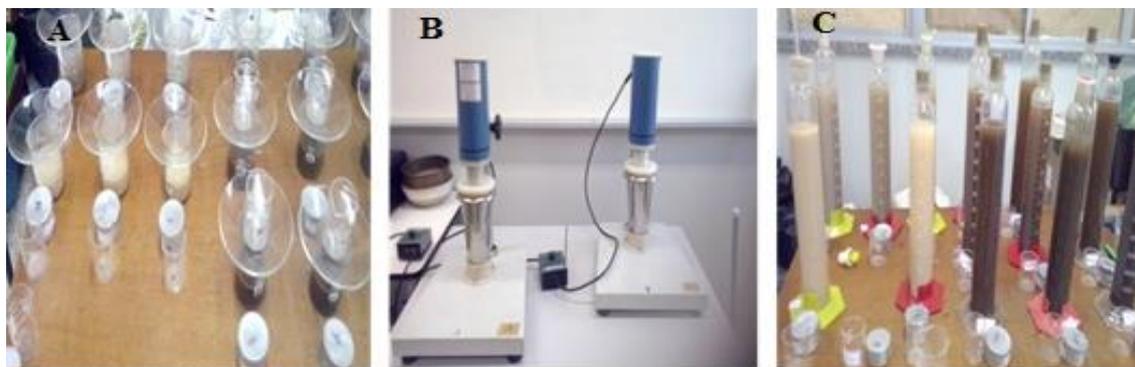
#### 3.5.1 Densidade de partículas

É dada pela razão entre a massa do solo seco e o volume por ele ocupado; foi determinada pelo método do balão volumétrico, o qual tem como princípio, determinar o volume de álcool necessário para completar um balão volumétrico de 50 ml contendo 20g de solo seco em estufa (FLINT e FLINT, 2002).

#### 3.5.2 Granulometria

Representada pela distribuição quantitativa das partículas individuais do solo quanto ao tamanho; esta foi determinada pelo método da pipeta descrito por Gee e Or (2002), ilustrada na Figura 5. Sendo resumidamente descrita a seguir.

Figura 5. Etapas da análise granulométrica. A= TFSA na solução de hidróxido de sódio para dispersão química das partículas; B= Agitador para a dispersão física das partículas; C= cilindros com material disperso para sedimentação.



Fonte: Autor

Em que 20 g de TFSA com hidróxido de sódio foram utilizados para a dispersão de partículas com diâmetros menores do que 0,053, sendo que essa dispersão possibilitou a separação seguindo a Lei de Stokes de partículas menores como o silte e argila. Já para as partículas de tamanhos maiores foram separadas por peneiramento em malha 0,053 mm de diâmetro e fracionadas segundo a classificação granulométrica do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), (Tabela 2).

Tabela 2 - Características físicas do solo (granulometria, argila natural, grau de floculação, classe textural).

Prof.	Granulometria						Silte	Argila	AN	Grau de Floc.	Classe Textural
	Areia										
m	MG	G	M	F	MF	Total	g kg <sup>-1</sup>				
0,05-0,9	47	123	337	202	117	826	114	60	40	33	Areia Franca
1,0+	24	50	205	240	48	567	93	340	111	68	Franco-argilo-arenosa

Prof. 0,05-0,9 cm para coleta do material arenoso; 1,0+ para coleta do material argiloso; MG: muito grossa (2,00-1,00 mm); G: grossa (1,00-0,50 mm); M: média (0,50-0,25 mm); F: fina (0,25-0,10 mm); e MF: muito fina (<0,10-0,05 mm).

### 3.5.3 Argila dispersa em água

Representada pela quantidade de argila facilmente dispersa em contato com água existente numa amostra de solo. Para a sua determinação seguiu-se o mesmo procedimento utilizado na granulometria, com exceção de não utilizar o agente químico como dispersante (Tabela 2).

### 3.5.4 Porosidade e distribuição de tamanhos de poros.

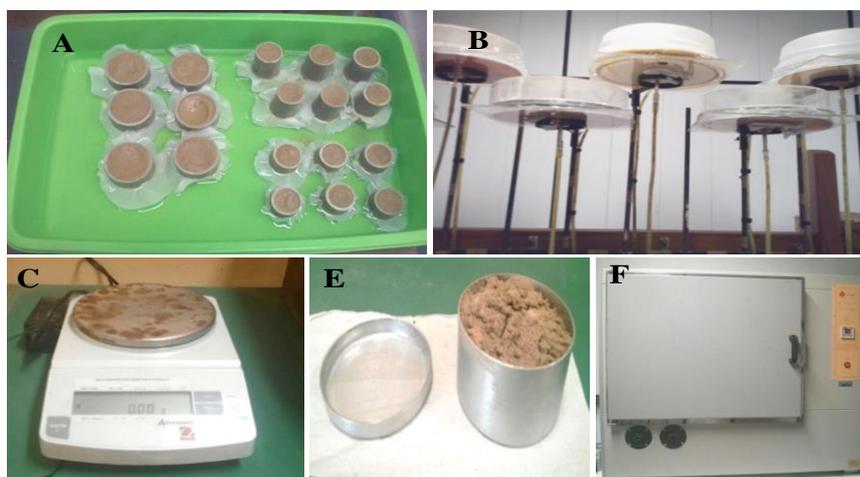
A porosidade total do solo é a razão entre o volume de vazios e o volume total; esta foi determinada pela razão entre a densidade do solo e a densidade de partícula (EMBRAPA, 2011), conforme equação (5)

$$\text{Porosidade total} = 1 - \left( \frac{\text{densidade do solo}}{\text{densidade de partículas}} \right) \quad \text{Eq. (5)}$$

A microporosidade foi determinada pelo método da mesa de tensão Figura 6 (B), em que ao aplicar uma tensão (nível de sucção) correspondente 6 kPa (60 cca, centímetros de coluna de água), a água foi drenada dos macroporos, poros com  $\varnothing \geq 0,05$  mm.

Para determinação da massa de solo úmido, após as amostras terem atingido o equilíbrio, ou seja, uma sucção igual à pressão aplicada, estas foram pesadas e em seguida levadas à estufa a 105°C para obtenção do peso seco, como ilustra a Figura 6, com esse procedimento obteve-se a umidade em base massa (grama de água por grama de solo), para fins de cálculo a umidade em base massa foi transformada em umidade volumétrica (centímetro cúbico de água por centímetro cúbico de solo), por meio da multiplicação do seu valor pelo valor da densidade do solo. A macroporosidade foi calculada pela diferença dos valores conhecidos de porosidade total e microporosidade (EMBRAPA, 2011).

Figura 6 - Etapas para determinação da microporosidade. A= Cilindros contendo os corpos de prova em condição de saturação; B= Mesa de tensão; C= Balança de precisão; E= Lata de alumínio com fração do corpo de prova; F= Estufa à 105°C para obtenção do peso fresco.

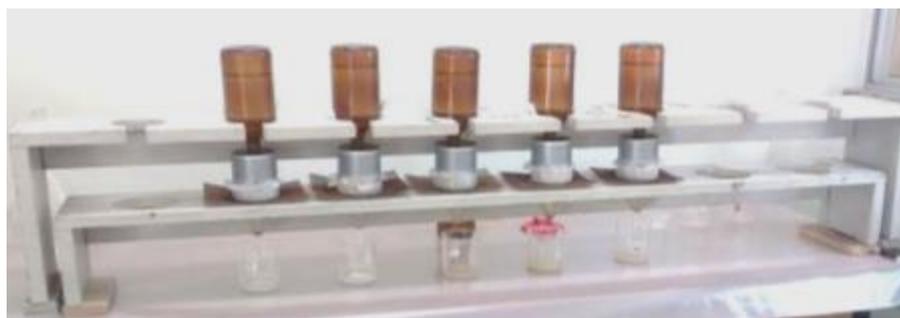


Fonte: autor

### 3.4. Condutividade hidráulica do solo saturado

A condutividade hidráulica do solo saturado foi determinada com base na metodologia descrita por Klute e Dirksen (1986), com a utilização do permeâmetro de carga constante (Figura 7), sendo que o bloco de solo utilizado para execução da análise foi constituído pelo corpo de prova anteriormente citado no item 3.3, estes em condição de confinamento foram submetidas a uma saturação lenta no sentido ascendente e assim permaneceram por um período de 24h até a saturação, ou seja, condição esta em que todo o espaço poroso do corpo de prova estava preenchido por água, e só então a análise foi executada. Para a manutenção da carga hidráulica constante cilindros de 2,5 cm de altura foram utilizados.

Figura 7. Permeâmetro de carga constante, com estruturas de madeira e garrafas de vidro como reservatórios de água.



Fonte: Autor.

Para cálculo do valor da condutividade hidráulica do solo saturado, foi utilizada a Lei de Darcy, conforme equação (6):

$$q = -K \cdot \text{grad } H \quad \text{Eq. (6)}$$

Em que:  $q$  = densidade de fluxo [L.m.T<sup>-1</sup>];  
 $\text{grad } H$  = gradiente de potencial total (m.m<sup>-1</sup>);  
 $K$  = Condutividade hidráulica [L.T<sup>-1</sup>]

Para as condições experimentais o cálculo da condutividade hidráulica do solo saturado se deu pela equação a seguir.

$$K_o = V_a \cdot L / [(A \cdot t \cdot (L + h))] \quad (6a)$$

Em que:

$K_o$  = condutividade hidráulica do solo saturado [L.T<sup>-1</sup>];  
 $V_a$  = volume de água coletado no intervalo de tempo “ $t$ ” [L<sup>3</sup>];  
 $L$  = comprimento da amostra [L];  
 $A$  = área da seção transversal da amostra [L<sup>2</sup>];  
 $h$  = potencial de pressão no topo da amostra [L];  
 $t$  = tempo de coleta [T].

### 3.5. Correção da massa de solo

Antes de proceder as análises, foi tomado todo cuidado para que a massa equivalente ao corpo de prova fosse de acordo com a densidade e do volume correspondente a cada cilindro, como explica passo a passo item 3.2. No entanto, mesmo em condições controladas ainda existe a possibilidade de uma desuniformidade uma vez que para a montagem da amostra não foi utilizado nenhum equipamento, sendo todo procedimento executado de forma manual. Tendo em vista que os cilindros contendo os corpos de prova além de terem sido utilizados para medida da condutividade hidráulica do solo saturado, também foi usado para determinar o volume de poros. Ao final da análise da condutividade hidráulica do solo saturado foi identificada a ocorrência de uma

heterogeneidade na acomodação das partículas, o que levou a alterações nos valores de densidade e conseqüentemente na porosidade total, os quais tiveram que ser recalculadas.

No conjunto de amostras que foi observado tal efeito e sendo que estas ainda seriam utilizadas para determinação do volume de poros, ao retirar o cilindro que servia como suporte para manutenção da carga hidráulica, era aferido se a massa de solo tinha se acomodado ou se expandido, para as amostras que assim se comportaram um paquímetro digital foi utilizado para medir o valor correspondente ao material que tivesse ultrapassado a borda do cilindro ou para medir o quanto da parede do cilindro ficou exposta após o material ter sido disposto.

Com esse procedimento foi possível recalcular os valores de densidade do solo e da porosidade total, na qual a primeira foi utilizada para determinação do volume de microporos; e a segunda, para posteriormente juntamente com valores de microporosidade, determinar o volume ocupado pelos macroporos, além de corrigir os valores da condutividade hidráulica do solo saturado que também teve que ser alterada já que o volume da amostra pelo qual a água atravessava foi modificado para mais ou para menos.

### **3.6 Delineamentos e Análise dos dados**

O presente experimento foi analisado em delineamento inteiramente casualizado (DIC) em esquema fatorial para cada classe textural 4x5 (quatro diâmetros e cinco alturas), totalizando 20 tratamentos, cada tratamento com 6 repetições compostos por 120 unidades experimentais para cada classe de solo, para as ambas a variáveis analisadas.

Para a variável condutividade hidráulica do solo saturado foi verificado que a distribuição normal não se adequou aos dados originais, tendo em vista esse ser um pressuposto para análise de variância, para estes dados foi aplicado o teste de Box- Cox (Box & Cox, 1964), a fim de encontrar a melhor transformação no intuito de estabilizar ou diminuir a variabilidade existente e com isso normalizar os resíduos. Aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk a 5% de probabilidade para verificar a normalidade dos dados. Ambas as variáveis foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo do teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para os dados obtidos para determinação do volume de poros (macroporosidade, microporosidade e porosidade total), análise foi mediante a utilização da estatística

descritiva clássica. Procedimento este aplicado para averiguar a existência de (*outliers*) valores periféricos que pudessem comprometer o comportamento médio dos parâmetros avaliados, bem como para avaliar qual o grau de variação desses dados em torno da média observada.

Também foram empregadas técnicas multivariadas de análise de componentes principais (ACP) para o entendimento de como as variáveis interagem ao mesmo tempo. Foram considerados as variáveis: diâmetro e altura dos cilindros, condutividade hidráulica do solo saturado, porosidade total, microporosidade e macroporosidade, cujos valores foram normalizados para média igual a 0 e a variância igual 1 a fim de compor as variáveis utilizadas na ACP. Com a ACP para essas variáveis foram gerados 5 componentes, as quais 2 (ACP) foram escolhidas para cada classe de solo, pois juntas (CP1 e CP2), explicam 82,04 % da variância dos dados originais para o solo argiloso e (CP1 e CP2) para o solo arenoso, a variância dos dados originais é explicado 85,89% pelas duas componentes, com a utilização do software XLSTAT, versão gratuita (XLSTAT, 2015).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o teste das hipóteses de fluxo preferencial por entre a amostra de terra e a parede do cilindro que a contém, a condição ideal é não variar nenhum outro atributo que possa contribuir para o fluxo, mas apenas a condição de contorno solo/parede do cilindro. Para tanto, pretendeu-se confeccionar todos os corpos de prova com a mesma densidade do solo (diferentes apenas entre as amostras com texturas diferentes) e, como consequência, também manter igual a porosidade total e distribuição de tamanho de poros.

Ocorreram, no entanto, apesar de todo o cuidado dispensado na confecção dos corpos de prova, algumas variações nos atributos acima. Com isso, considerou-se pertinente fazer algumas análises dos dados relativos a esses atributos, a fim de se verificar se as variações nos valores de porosidade total, macro e microporosidade poderiam explicar variações na condutividade hidráulica do solo saturado.

### 4.1. Densidade do solo, densidade de partículas e porosidade total

As amostras foram analisadas quanto ao valor de densidade de partículas. A partir dos valores de densidade do solo pré-estabelecidos, ter-se-ia valores de porosidade total dos corpos de prova. Os valores são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Densidades do solo pré-estabelecidas, densidades de partículas medidas e porosidade total calculada para as duas amostras de terra utilizadas no experimento.

Profundidade	Densidade		
	Solo	Partícula	Porosidade Total
m	----- kg m <sup>-3</sup> -----		%
<b>0,05 – 0,9</b>	1400	2670	48
<b>1,0 +</b>	1200	2550	53

Profundidade 0,05-0,9 m: camada para coleta do material arenoso e 1,0+ m, para coleta do material argiloso.

Percebe-se que os valores de densidade do solo, e também os valores de porosidade total, estão de acordo com ocorrências reais para solos dessas classes texturais. Segundo Libardi (2005), para a maioria das amostras de solo mineral natural a densidade do solo varia de 0,7 a 2,0 g cm<sup>-3</sup>, e que, quanto maior o teor de argila de um solo, menor será a sua densidade. Os valores observados na Tabela 2 quanto aos teores de argila para

as amostras de terras utilizadas no presente estudo justificam os valores admitidos para a densidade do solo.

Também os valores de densidade de partículas encontrados para as amostras de terra são semelhantes aos encontrados na literatura. De acordo com Buckman e Brady (1974), para maioria dos solos minerais a densidade de partícula aproxima-se da densidade das rochas, haja vista ser o quartzo o componente dominante, com valor médio em torno de  $2650 \text{ kg m}^{-3}$ , e oscilando de  $2600$  a  $2700 \text{ kg m}^{-3}$ . Com relação aos valores observados o indicativo para valor da média a partir da profundidade de  $1,0 \text{ m}$  apresenta-se abaixo do médio universal se dá devido à existência de partículas menos densas que o quartzo o que leva a diminuição do valor da densidade de partículas.

Em conhecendo-se o valor da densidade do solo e de partículas, foi possível então realizar o cálculo da porosidade total. Para ambos os materiais, a porosidade total do solo, desde que os corpos de prova fossem confeccionados mantendo os valores de densidade pré-determinados, ficariam dentro da faixa esperada para solos de textura franca ou argilosa, com valores variando de  $47,2\%$  a  $61,5\%$  (LIBARDI 2005 e KIEHL 1979).

De acordo com Amaro Filho; Assis Júnior; Mota (2008), a variação nos limites existente para a porosidade total de um solo é bastante ampla. Visto que o volume de poros é dado de acordo com a granulometria e de como as partículas estão dispostas, a presença de partículas com tamanhos mais uniforme em solos, torna-o mais poroso do que solos com separados de tamanhos diferentes, tendo em vista que nesse caso, os espaços livres existentes entre as frações mais grosseiras é preenchidos pelo material mais fino.

#### **4.1.1. Densidade do solo e porosidade total obtidos nos corpos de prova**

Os corpos de prova foram confeccionados de acordo com os valores de densidade do solo previamente estabelecidos. Com a realização do experimento, isto é, a saturação do material e os testes de condutividade hidráulica, as partículas foram submetidas a um rearranjo e os valores originalmente estabelecidos foram alterados. Observa-se que as variações ocorridas na amostra de terra arenosa foram menores que aquelas acontecidas nas amostras de granulometria mais fina. As possibilidades de rearranjo nessas são maiores que naquelas.

Na Tabela 4 pode-se ver os valores finais de densidade do solo e porosidade total para as duas classes texturais, em todas as combinações de diâmetros e alturas dos cilindros. É interessante ressaltar que há uma variabilidade esperada no procedimento de montagem corpos de prova, tendo em vista que, em procedimentos dessa natureza, a variabilidade embutida nos resultados, ou seja, o erro total, pode ser de 15-20% (EMBRAPA, 1999a; MONTESIANOS *et al.*, 2002). Outra explicação pode ser atribuída ao próprio comportamento da água que pode ter traslocado o material mais fino e com isso ter obstruído os poros, ou até mesmo pelos ciclos de umedecimento e secagem pelo qual as amostras passaram.

Uma vez que o material utilizado passou pelas etapas supracitadas, tanto na confecção do corpo de prova como por ressaturação das amostras (ciclos de umedecimento e secagem) e movimento de água através da coluna de solo, a acomodação das argilas pode ter provocado as variações que foram observadas; essas variações foram aleatórias, ora aumentando um pouco o valor da densidade, ora diminuindo-o.

Vale salientar que essa variação não ultrapassou a margem pré-estabelecida para procedimentos em laboratório (EMBRAPA, 1999a; MONTESIANOS *et al.*, 2002), com valores situando em torno de 5%, para mais ou para menos, em relação aos valores iniciais fixados para a densidade e calculados para a porosidade total (Tabela 3).

Buscou-se fazer análise estatística das variações. Devido ao fato de as médias para as repetições apresentarem-se semelhantes ou muito próximas, o teste de comparação de médias não identificou nenhuma diferença estatística, o que leva a concluir que a porosidade total dentro do conjunto amostral foi controlada para ambas as classes de solos. Diante de tais considerações, a adoção do procedimento para a montagem das amostras é justificável. Heterogeneidade no sistema poroso é muito mais expressiva caso o procedimento de amostragem em campo tivesse sido adotado, já que, por maior que seja a uniformidade do solo, existem variações, mesmo em áreas homogêneas ou alusivas à mesma classe de solo, causando uma variação bastante acentuada quanto aos atributos químicos e físicos (AMARO FILHO *et al.*, 2007), tendo em vista que 80 -85% de erros introduzidos em resultados analíticos é proveniente da heterogeneidade da amostragem *in situ* (EMBRAPA, 1999a; MONTESIANOS *et al.*, 2002), o que dificulta que aferições sejam feitas a partir desses.

Tabela 4 - Densidade do solo ( $\rho_s$ ) e porosidade total do solo ( $\alpha$ ), após determinação da condutividade hidráulica do solo saturado.

Argiloso			Arenoso	
$\emptyset$	$\rho_s$ kg m <sup>-3</sup>	$\alpha$ %	$\rho_s$ kg m <sup>-3</sup>	$\alpha$ %
<b>Ø1</b>				
<b>h1</b>	1230	51	1400	48
<b>h2</b>	1170	54	1400	48
<b>h3</b>	1240	54	1400	48
<b>h4</b>	1180	54	1400	48
<b>h5</b>	1180	54	1400	48
<b>Ø2</b>				
<b>h1</b>	1160	54	1400	48
<b>h2</b>	1160	55	1400	48
<b>h3</b>	1160	54	1400	48
<b>h4</b>	1190	54	1400	48
<b>h5</b>	1190	54	1400	48
<b>Ø3</b>				
<b>h1</b>	1200	53	1400	48
<b>h2</b>	1200	52	1430	46
<b>h3</b>	1200	52	1440	46
<b>h4</b>	1200	52	1430	46
<b>h5</b>	1200	52	1420	47
<b>Ø4</b>				
<b>h1</b>	1240	51	1450	46
<b>h2</b>	1250	51	1450	46
<b>h3</b>	1230	52	1450	46
<b>h4</b>	1260	51	1430	46
<b>h5</b>	1240	51	1420	47

Ø1: Ø2: Ø3: Ø4 diâmetros dos cilindros de 3,2, 5,0, 7,5 e 10 cm; h1, h2; h3; h4, h5 alturas dos cilindros de 3,2; 5,0; 7,5; 10; 15 cm. Respectivamente.

#### 4.2. Microporosidade e macroporidade

Na montagem de corpos de prova é possível obter valores pré-estabelecidos para densidade do solo e, com os valores de densidade de partículas, calcular a porosidade total. O controle da distribuição de tamanhos de poros, não obstante, não é possível por esse procedimento. Assim, é necessário se fazer as medidas, após a confecção dos corpos de prova, para a verificação dessa distribuição de poros.

Para a determinação do volume de poros correspondente à micro e macroporosidade seguiu-se o procedimento descrito no item 3.4.4. Ressalte-se que a condutividade hidráulica em solo saturado guarda estreita relação com distribuição de tamanho de poros, mormente os macroporos.

As médias obtidas nos ensaios foram contrastadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade a fim de conhecer a heterogeneidade dos valores dentro de cada nível dos fatores analisados. Os valores e resultados para contraste de médias são apresentados nas Tabelas 5 e 6 para os materiais argiloso e arenoso, respectivamente.

As médias de micro e macroporosidade obtidas para as interações entre os diâmetros e alturas dos cilindros para o solo argiloso estão expressos na Tabela 5, na qual se observa que, tanto para a microporosidade quanto para a macroporosidade houve diferença estatística. Para a microporosidade a variação foi de aumento à medida que se aumentou o diâmetro da amostra dentro da mesma altura; o efeito das alturas das amostras, para o mesmo diâmetro, foi pouco expressivo. Nas amostras de maior diâmetro há, também, maior área de secção transversal, acarretando maior espalhamento do material e patrocinando oportunidade de arrançamento mais compacto. Como consequência do aumento da microporosidade houve diminuição da macroporosidade em função do aumento do diâmetro da amostra, abstraindo-se a contribuição da porosidade total.

O que se pode observar, a partir dos valores, é o comportamento, via de regra, errático da distribuição de tamanho de poros, principalmente para solo arenoso (Tabela 6), refletindo tão somente o procedimento de montagem do corpo de prova. A distribuição dos tamanhos dos poros, nesse caso, não é consequência de pedogênese, mas da arrumação de material disperso por um procedimento estabelecido, atendendo, assim, muito mais à teoria das probabilidades. Ressalte-se, porém, que para se testar as hipóteses aventadas originalmente, não é importante a explicação da causa da distribuição dos tamanhos dos poros, mas como ela afetará a condutividade hidráulica do solo.

Mesmo que os testes de comparação de médias tenham identificado diferença estatística entre e dentro dos tratamentos, por meio da estatística descritiva apresentada na Tabela 7, assegura-se que os dados podem ser usados com segurança, pois os resultados mostram um indicativo de que os valores se encontram distribuídos simetricamente em torno da média e da mediana, e que estas medidas podem ser consideradas como valores típicos do conjunto de observações, ou seja, os resultados podem ser sumarizados por uma dessas medidas.

A média é considerada uma medida de posição ou medida de tendência central; já a mediana é dada pelo valor do meio ou média aritmética dos dois valores centrais, em uma sequência ordenada de dados. A relação entre elas é uma das formas de avaliar o

comportamento médio de um conjunto de dados, e com isso aferirem na prática a representatividade da estimativa do valor correto da amostra. Verifica-se que os valores de média e mediana para todas as variáveis estudadas em cada classe de solo se apresentam muito próximos ou iguais, mostrando distribuições simétricas dos dados (Tabela 7).

Tabela 5- Valores médios para a microporosidade e macroporosidade do solo argiloso.

<b>Microporos <math>\text{cm}^3\text{cm}^{-3}</math></b>					
	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>h3</b>	<b>h4</b>	<b>h5</b>
<b>Ø1</b>	0,254 bA	0,239 bB	0,254 bcA	0,256 aA	0,263 aA
<b>Ø2</b>	0,246 bA	0,250 bA	0,246 cA	0,238 bA	0,247 bA
<b>Ø3</b>	0,251 bAB	0,263 aA	0,262 abA	0,249 abB	0,253 abAB
<b>Ø4</b>	0,270 aAB	0,267 aAB	0,273 aA	0,259 aB	0,264 aAB
<b>Macroporos <math>\text{cm}^3\text{cm}^{-3}</math></b>					
<b>Ø1</b>	0,255 cC	0,300 aA	0,285 aB	0,283 bB	0,276 bB
<b>Ø2</b>	0,293 aA	0,299 aA	0,293 aA	0,301 aA	0,292 aA
<b>Ø3</b>	0,278 bA	0,256 bB	0,257 bB	0,270 cA	0,266 abB
<b>Ø4</b>	0,239 dA	0,242 cA	0,246 bA	0,250 dA	0,245 cA

Para as colunas classificação com letras minúsculas e linhas classificação com letras maiúsculas; As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Ø1: Ø2: Ø3: Ø4 diâmetros em (cm); h1, h2; h5,0; h7,5, h10 alturas em cm de 3,2; 5,0; 7,5; 10; 15. Respectivamente.

Tabela 6- Valores médios para a microporosidade e macroporosidade do solo arenoso.

<b>Microporos <math>\text{cm}^3\text{cm}^{-3}</math></b>					
	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>h3</b>	<b>h4</b>	<b>h5</b>
<b>Ø1</b>	0,240 aA	0,244 aA	0,207 aB	0,211 aB	0,169 bC
<b>Ø2</b>	0,196 cAB	0,204 cA	0,166 bC	0,174 bC	0,180 abBC
<b>Ø3</b>	0,245 aA	0,224 bB	0,202 aBC	0,217 aBC	0,183 abD
<b>Ø4</b>	0,215 bA	0,178 dCD	0,202 aAB	0,171 bD	0,193 aBC
<b>Macroporos <math>\text{cm}^3\text{cm}^{-3}</math></b>					
<b>Ø1</b>	0,235 bC	0,230 bC	0,272 bB	0,268 cB	0,310 aA
<b>Ø2</b>	0,283 aBC	0,275 aC	0,313 aA	0,305 aA	0,300 abAB
<b>Ø3</b>	0,234 bC	0,235 bC	0,258 bB	0,242 dBC	0,286 bcA
<b>Ø4</b>	0,244 bB	0,281 aA	0,257 bB	0,288 bA	0,276 cA

Para as colunas classificação com letras minúsculas e linhas classificação com letras maiúsculas; As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Ø1: Ø2: Ø3: Ø4 diâmetros em (cm); h1, h2; h5,0; h7,5, h10 alturas em cm de 3,2; 5,0; 7,5; 10; 15. Respectivamente.

Para as variáveis macroporosidade e porosidade total é possível observar igualdade ou uma aproximação entre os valores da média e da mediana para ambas as

classes texturais de solos estudados, ao observar a variável microporosidade e possível notar uma total igualdade entre os valores da média e da mediana para as duas classes de solos estudadas.

Tabela 7 - Estatística descritiva para volume de poros ( $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ ) para cada classe textural de solo analisado.

	N	Argiloso			Arenoso		
		Macro.	Micro.	PT	Macro.	Micro.	PT
		----- $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ -----					
<b>Média</b>	120	0,27	0,26	0,53	0,27	0,20	0,47
<b>Mediana</b>	120	0,27	0,26	0,53	0,27	0,20	0,48
<b>Min.</b>	120	0,23	0,23	0,51	0,19	0,15	0,46
<b>Máx.</b>	120	0,31	0,28	0,55	0,33	0,26	0,48
<b>DP</b>	120	0,02	0,012	0,013	0,03	0,03	0,01
<b>CV (%)</b>	120	8,1	4,7	2,5	10,7	13,1	2,00

Macro: macroporosidade, Micro: microporosidade, Arg: argiloso, Are: arenoso, N: número de dados, Var: variáveis, Min: mínimo, Max: máximo, DP: Desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

O desvio padrão é recomendável como estatística de avaliação da variabilidade, por revelar a heterogeneidade e a dispersão entre os seus elementos, perante a unidade de medida original (LIBARDI *et al.*, 1996), em que desvios grandes são atribuídos a dados heterogêneos e com elevada dispersão, e, ao contrário, desvios menores são indicação de que os dados se apresentam de forma mais homogênea e como consequência com menor dispersão. Cada variável analisada apresenta um desvio padrão, para as duas classes de solo, relativamente baixo comparado com as suas respectivas médias (Tabela 7), o que é reflexo de pequena dispersão dos valores com relação à média.

Analisando o CV para cada variável nas distintas classes de solo, nota-se que no solo argiloso a variação apresentou-se menor quanto às variáveis macro e microporosidade, isso provavelmente devido às propriedades cimentantes da argila e que por ter a tendência de revestir-se e em combinação com a fração areia forçar a formação de uma maior compactação, de acordo com o relatado por (ARAÚJO, 2004), o que torna então o rearranjo das partículas mais fácil. A amplitude na distribuição de tamanhos das partículas que podem ser visualizadas na (Tabela 2), reforçam que podem ter espaços entre poros maiores preenchidos por partículas menores, e que, o espaço entre estas, sejam preenchidos novamente por partículas ainda muito mais finas, possibilitando uma uniformidade na acomodação dentro dos cilindros.

Quanto ao solo arenoso a maior variação pode ser explicada pela disposição, forma e continuidade dos poros da amostra dentro de cada cilindro, já que em solos arenosos a quantidade de partículas maiores é maior, o que pode ser visto na Tabela 2, a qual mostra que para o solo arenoso há um predomínio da fração areia, e que por isso o rearranjo entre as partículas pode não ter sido dado igualmente, haja vista a menor interação entre elas, dada pela menor superfície específica dos minerais que constituem a fração areia.

Com relação à porosidade total para ambas as classes de solo estudadas, no qual estão incluídos os valores de macro e microporosidade, o coeficiente de variação apresentou valores muito baixos, o que provavelmente não seria obtido se as amostras fossem retiradas diretamente em campo, tendo em vista a heterogeneidade espacial dos atributos físicos do solo.

Algumas proposições para identificar a extensão da variabilidade das propriedades do solo com base no seu coeficiente de variação são dadas por Warrick e Nielsen (1980) e Mulla e McBratney (2000), em que para os primeiros autores a classificação da variabilidade das propriedades do solo, pelo coeficiente de variação, é dividida em três níveis: baixa variação ( $CV < 12\%$ ), média ( $12\% < CV < 80\%$ ) e alta ( $CV > 80\%$ ). Por outro lado, os segundos autores classificam em um esquema bem mais rígido, no qual valores de 0-15%, 16-35% e  $> 36\%$ , para o coeficiente de variação em pequena, média e alta de modo respectivo. Confrontando os valores observados na estatística descritiva e os valores  $CV_s$  adotado como critérios de classificação propostos pelos autores, é possível afirmar a precisão da pesquisa.

O coeficiente de variação é um número que representa a medida relativa da variabilidade, o qual indica a precisão dos dados e a possibilidade de fazer comparações de forma segura entre valores diferentes. Com relação aos valores de  $CV_s$  observados na Tabela 7, é possível afirmar que, para ambas as classes de solo, dentro de todas as combinações de diâmetros e alturas, a distribuição de poros por tamanho não afetaram significativamente os dados de condutividade hidráulica do solo, quando comparado com o efeito de fluxo preferencial promovido pelo aumento da área disponível ao fluxo na interface solo/parede do cilindro.

#### 4.5 Análise Multivariada

A determinação da condutividade hidráulica do solo saturado em laboratório demonstra-se ser muito influenciada pelo tamanho da coluna de solo (MALLANTS *et al*, 1997), bem como pela relação existente com a textura, densidade e estrutura do solo, e consequentemente com a forma de poros, tamanho e continuidade dos mesmos.

Dentro de todos esses fatores destaca-se a dependência que os macroporos, exercem na medição de  $K_o$ , em que à presença desses tende a aumentar variabilidade, principalmente quando amostras de pequenas dimensões são utilizadas (MOHANTY *et al.*, 1994a).

A fim de confrontar a relação existente entre os valores obtidos para a condutividade hidráulica saturada, e avaliar qual o fator foi determinante na variação desses, foi utilizada a estatística multivariada, tendo em vista que a estatística univariada identificou uma diferença significativa para o volume de micro e macroporos entre tratamentos. A estatística multivariada é uma importante ferramenta para avaliar a correlação entre variáveis, e com isso compreender o conjunto de dados analisados dentro de cada uma e a interação entre eles, além de identificar resultados que a estatística univariada não mostra (MOTA *et al.*, 2014). Mediante as informações obtidas pelas duas formas de avaliação dos dados, univariada e multivariada foi possível determinar se os resultados para os valores obtidos para a condutividade hidráulica do solo saturado foi mais influenciado pelo tamanho da coluna de solo ou se deu pela variação dos tamanhos dos poros.

Essa correlação foi feita por meio da análise de componentes principais, que é uma técnica matemática de análise multivariada, que permite identificar em conjunto numeroso de dados e às medidas que foram causadoras das maiores variações entre os resultados sem perdas consideráveis de informações. Nessa técnica o conjunto de dados originais é transformado em outro conjunto de dimensões equivalentes, em que essa transformação se dá com a menor perda possível de informações, como também exclui algumas variáveis originais que possuam pouca informação (VICINI, 2005).

A matriz de dados para análise de componentes principais (ACP) foi composta por 5 variáveis. Foram obtidos 5 componentes que são apresentados na Tabela 8, juntamente com seus respectivos autovalores e variabilidade explicada. Os componentes principais foram escolhidos levando-se em conta o critério de Kaiser (1958), no qual são

selecionados autovalores acima da unidade, por indicarem informações importantes que não devem ser desconsideradas. Desta forma, foram selecionados os componentes principais CP1 e CP2 por estarem de acordo com as condições exigidas. Tais componentes, unidos, explicam 82,04 % da variância dos dados, sendo 63,36 %, 18,69% explicada pelos fatores 1 e 2 para análise dentro da classe textural argilosa e para o solo arenoso 85,89 % é explicado pela variância das componentes unidas, sendo 47,70% e 38,18 explicada pelo fator 1 e 2 respectivamente (Tabela 8).

Tabela 8 - Autovalores e porcentagem explicada por cada componente para as duas classes de solos estudadas.

<b>Componentes Principais</b>	<b>Autovalores</b>	<b>Variabilidade explicada (%)</b>	<b>Variável explicada e acumulada (%)</b>
<b>Argiloso</b>			
1	3,801	63,357	63,357
2	1,121	18,686	82,043
3	0,631	10,523	92,566
4	0,361	6,008	98,575
5	0,086	1,425	100,000
<b>Arenoso</b>			
1	2,862	47,702	47,702
2	2,291	38,183	85,885
3	0,518	8,632	94,517
4	0,202	3,372	97,889
5	0,127	2,111	100,000

Fonte: Autor

Na Tabela 9 é apresentada a contribuição em percentual de cada variável para o respectivo componente principal. Analisando-se o CP1, as variáveis que melhor explicaram ou mais contribuíram para o solo argiloso foram o diâmetro, condutividade hidráulica do solo saturada e microporosidade e macroporosidade e porosidade total, já para o solo arenoso as variáveis que mais explicaram a CP1, foram diâmetro, condutividade hidráulica do solo saturado, macroporosidade e porosidade total. Com relação a CP2 a variável que mais explica é a altura para o solo argiloso e as variáveis que mais contribuíram para CP2 dentro do solo arenoso foram micro e macroporosidade. Valores de correlação entre os componentes principais e as variáveis acima 0,6, em módulo, significam que tais variáveis são as que têm maior contribuição para o referido componente (SANTOS, 2010).

Tabela 9 - Correlação entre as variáveis e componentes principais e sua respectiva contribuição para cada componente para o solo argiloso.

	<b>Variável</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP1 (%)</b>	<b>CP2 (%)</b>
<b>Argiloso</b>	Diâmetro	-0,865	0,134	19,702	1,607
	Altura	0,233	0,924	1,433	76,099
	Ko	-0,817	-0,359	17,566	11,503
	Microporos	-0,784	0,314	16,164	8,773
	Macroporos	0,952	-0,150	23,837	23,837
	PT	0,900	-0,004	21,298	0,002
<b>Arenoso</b>	Diâmetro	0,793	-0,534	21,965	12,446
	Altura	-0,426	-0,662	6,330	19,158
	Ko	0,867	-0,363	26,266	5,743
	Microporos	0,387	0,884	5,221	34,118
	Macroporos	-0,670	-0,692	15,698	20,920
	PT	-0,838	0,418	24,520	7,615

Fonte: Autor

Observa-se no Gráfico 1, quanto maior a distância das variáveis em relação ao centro mais importante ela será para explicação da variância dos dados dentro da componentes. Da mesma forma, o ângulo de inclinação da linha em relação a cada eixo, indica o quanto esta variável é correlacionada com a componente principal, sendo bem ou mal correlacionada quando o ângulo é pequeno ou grande respectivamente.

Diante do exposto, percebe-se no Gráfico 1 (A e B), que as variáveis estão distantes do centro, indicando boa contribuição aos componentes principais.

De acordo com o Gráfico 1 (A), que trata dos componentes principais 1 e 2 para os solo argiloso observa-se alta correlação, neste caso positiva entre diâmetros e condutividade, da mesma forma foi observado para o solo arenoso Gráfico 1 (B), para o solo argiloso uma correlação positiva entre diâmetro e microporosidade também foi indenicada Gráfico 1 (A) o que já tinha sido observado como tendência na estatística univariada.

No entanto pelos valores da matriz de correlação de Person observa-se que a correlação entre diâmetro e condutividade hidráulica do solo saturado foi mais acentuada tanto para as duas classes texturais o que confirma os dados observados na estatística univariada, em que à medida que o volume do cilindro foi alterado via aumento nos diâmetros (perímetro) houve um aumento significativo dos valores de Ko, admitindo-se que esse aumento tenha sido causado por passagens preferenciais de fluxo pela interface solo/parede do cilindro, haja vista que não houve uma correlação forte positiva entre condutividade hidráulica do solo saturado com a micro e a macroposidade,

principalmente pela macroporosidade pela sua relevância em estudos de dinâmica da água em solo em meios porosos saturados. No entanto uma relação forte negativa foi observada entre os macroporos no solo argiloso e a condutividade hidráulica do solo saturado Gráfico 1 (A) e Tabela 10, essa correlação considerou o fato de que os os maiores valores de condutividade hidráulica do solo saturado foi obtido, nas combinações onde os valores de macroporosidade decresceram (Tabela 11 e Tabela 5), o que evidencia que o aumento nos valores da condutividade hidráulica do solo saturado se deu por passagens preferenciais, pois a diminuição nos valores de macroporosidade implicaria em menores valores de  $K_o$ , já que nessa condição de maior volume de redes de macroporos facilitariam o movimento descende mais rápido.

Outro comportamento pertinente para justificar a presença de fluxo preferencial deu-se pelos valores de correlação de Person entre a variáveis  $K_o$  e porosidade total Tabela 10 o que também pode ser visualizado nos Gráficos 1 (A e B) os quais mostram que ambas as variáveis encontram-se em quadrantes opostos indicando uma correlação negativa entre elas. Entretanto o fenômeno da permissão do solo à passagem de água não admite essa representação, uma vez que valores de porosidade total jamais poderiam está correlacionados de forma forte negativa com os valores de  $K_o$ , justificando que o fluxo foi facilitado por um fator que não os inerentes ao sistema poroso do solo.

Para as variáveis microporosidade e macroporosidade por estarem situadas em quadrantes opostos, apresentaram correlação negativa o que já era esperado, tendo em vista que à medida que um aumenta o outro diminui (Gráfico 1 A,B).

Para a variável altura observa-se comportamento contrário com  $K_o$  para o solo argiloso, indicando que com aumento da altura fixando os valores de diâmetros a uma diminuição nos valores de  $K_o$ , esse fato é atribuído a diferença de gradiente de potencial total. sendo que para as demais variáveis não houve efeito de altura Gráfico 1 (A), para o solo arenoso houve uma correlação negativa entre a altura do cilindro e a microporosidade e positiva com a macroporosidade, no entanto para ambos os casos não é considerado uma correlação forte.

Tabela 10 - Matriz de correlação Pearson para o solo argiloso e arenoso.

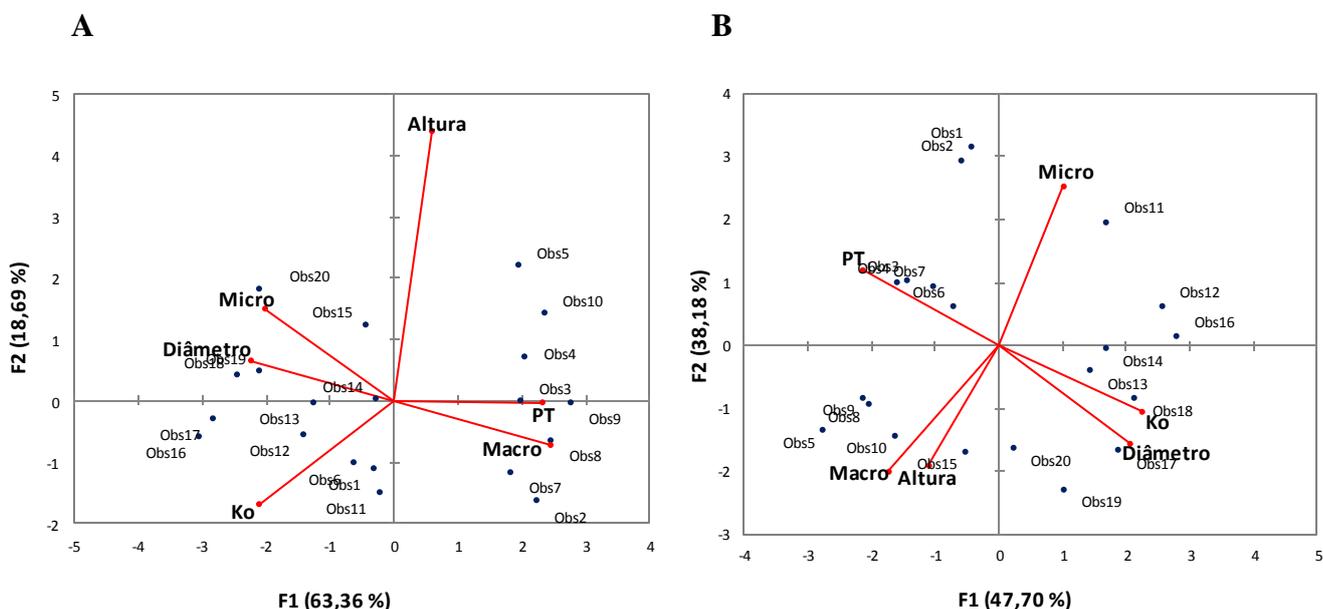
Argiloso						
Variáveis	Diâmetro	Altura	Ko	Micro	PT	Macro
Diâmetro	<b>1</b>	0,000	0,796	0,606	-0,678	-0,724
Altura	0,000	<b>1</b>	-0,401	-0,034	0,187	0,137
Ko	0,796	-0,401	<b>1</b>	0,396	-0,672	-0,622
Micro	0,606	-0,034	0,396	<b>1</b>	-0,588	-0,852
PT	-0,678	0,187	-0,672	-0,588	<b>1</b>	0,925
Macro	-0,724	0,137	-0,622	-0,852	0,925	<b>1</b>

Arenoso						
Variáveis	Diâmetro	Altura	Ko	Micro	PT	Macro
Diâmetro	<b>1</b>	0,000	0,850	-0,156	-0,834	-0,152
Altura	0,000	<b>1</b>	-0,149	-0,594	0,050	0,585
Ko	0,850	-0,149	<b>1</b>	0,014	-0,800	-0,301
Micro	-0,156	-0,594	0,014	<b>1</b>	0,056	-0,933
PT	-0,834	0,050	-0,800	0,056	<b>1</b>	0,307
Macro	-0,152	0,585	-0,301	-0,933	0,307	<b>1</b>

Ko: condutividade hidráulica do solo saturado; Micro: microporosidade; Macro: macroporosidade.

Gráfico 1- Dispersão dos atributos físicos, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e condutividade hidráulica do solo saturado, obtidos em amostras de volumes variados mediante a combinação de diferentes diâmetros e alturas. Figuras (A e B) solo argiloso e arenoso respectivamente. Os quais são representados pelas observações que são correspondentes as combinações de diâmetros e alturas dos cilindros. **Obs1:** 3,2 x 3,2; **Obs2:** 3,2 x 5,0; **Obs3:** 3,2 x 7,5; **Obs4:** 3,2 x 10; **Obs5:** 3,2 x 15; **Obs6:** 5,0 x 3,2; **Obs7:** 5,0 x 5,0; **Obs8:** 5,0 x 7,5; **Obs9:** 5,0 x 10; **Obs10:** 5,0 x 15; **Obs11:** 7,5 x 3,2; **Obs12:** 7,5 x 5,0; **Obs13:** 7,5 x 7,5; **Obs14:** 7,5 x 10; **Obs15:** 7,5 x 15; **Obs16:** 10 x 3,2; **Obs17:** 10 x 5,0; **Obs18:** 10 x 7,5; **Obs19:** 10 x 10; **Obs20:** 10 x 15.



#### 4.6 Condutividade hidráulica do solo saturado

De acordo com a análise variância (apêndice A) houve efeito significativo nos valores de  $K_o$  para todas as fontes de variação tanto para os fatores isolados quanto para a interação entre eles.

Uma análise detalhada sobre o comportamento da condutividade hidráulica do solo saturado para cada classe de solo, dentro das fontes variação diâmetro e altura, encontra-se na (Tabela 11) e no Gráfico 2 (A e B).

Tabela 11- Comparação dos valores médios da raiz da condutividade hidráulica do solo saturado  $K_o$  ( $\text{cm h}^{-1}$ ) para todos os tratamentos.

<b>Argiloso</b>					
	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>h3</b>	<b>h4</b>	<b>h5</b>
<b>Ø1</b>	3,01 cB	3,55 cA	1,97 dC	1,73 dC	1,44 cD
<b>Ø2</b>	3,92 bA	3,37 cB	2,32 cC	2,02 cD	1,93 bD
<b>Ø3</b>	4,57 aA	4,25 bB	4,15 bBC	3,98 bC	4,01 aBC
<b>Ø4</b>	4,77 aA	4,75 aA	4,42 aB	4,63 aAB	4,02 aC
<b>Arenoso</b>					
<b>Ø1</b>	3,31 cAB	3,27 bB	3,60 cAB	3,43 bAB	3,71 bA
<b>Ø2</b>	4,23 bA	3,59 bB	3,68 cB	3,50 bB	4,63 aA
<b>Ø3</b>	5,78 aA	6,05 aA	5,11 bB	5,13 aB	4,39 aC
<b>Ø4</b>	5,80 aAB	6,10 aA	5,63 aB	5,16 aC	4,48 aD

Para as colunas classificação com letras minúsculas e linhas classificação com letras maiúsculas; As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Ø1: Ø2: Ø3: Ø4 diâmetros em (cm); h1, h2; h5,0; h7,5, h10 alturas em cm de 3,2; 5,0; 7,5; 10; 15. Respectivamente.

A condutividade hidráulica do solo saturado aumentou com o aumento no diâmetro da amostra, isto é, com o aumento no perímetro da interface solo/parede do cilindro (Tabela 11). Esse perímetro, segundo a hipótese aventada, é responsável pela ocorrência de fluxo preferencial. Para o solo argiloso houve aumento de 58% no valor da condutividade hidráulica das amostras de 3,2 cm de altura com a variação no perímetro de 10,05 cm para 31,41 cm (Tabela 1). Para o mesmo solo, na maior altura de amostras (15 cm), o aumento na condutividade hidráulica foi de 179%.

Essa ocorrência foi mais pronunciada à medida que se aumentou a altura da amostra. No entanto, isso não significa efeito da altura da amostra, uma vez que todos os valores de condutividade hidráulica diminuíram com o aumento na altura da amostra, como será explicado adiante. Aqui houve, também, um efeito de diâmetro, uma vez que

a diminuição na  $K_o$  com o aumento na altura da amostra é maior para os menores diâmetros.

O efeito perímetro também foi observado para o material arenoso, indicando que a hipótese de fluxo preferencial na interface solo/parede é fortemente provável. No entanto, aqui houve um comportamento um tanto diferente daquele do solo argiloso. A variação da condutividade hidráulica com o aumento do perímetro foi mais acentuada nas amostras de menor altura (75% contra 58% do solo argiloso) e menos pronunciado na amostra de maior altura (21% contra 179% do solo argiloso).

Abstraindo-se a altura da amostra, isto é, considerando a média de condutividade hidráulica de todas as alturas para cada diâmetro,  $K_o$  aumenta com o aumento do diâmetro (perímetro) e foi maior para o solo argiloso (93%) do que para o solo arenoso (57%).

A explicação para tal ocorrência está na resistência à passagem da água nos solos com diferentes texturas. A água, ao ter que passar por solo argiloso sofre muito maior resistência do que para passar por solo arenoso. Havendo igual fluxo preferencial nos dois casos, a diferença relativa da condutividade hidráulica será, obrigatoriamente, maior para o solo de maior resistência. O fluxo de água nos macroporos ocorre em condição muito semelhante, ou até mesmo igual àquela de fluxo preferencial. Embora a macroporosidade não seja muito diferente entre os dois solos (Tabelas 5 e 6), a maior microporosidade do solo argiloso concorreu para a maior resistência ao fluxo nesse solo.

Observando os valores de macroporosidade e microporosidade do solo argiloso (Tabela 5) e porosidade total (Tabela 4) e relacionando-os com os valores de condutividade hidráulica, pode-se afirmar que eles não contribuíram para a variação de  $K_o$ , corroborando a hipótese de fluxo preferencial. A macroporosidade, de grande influência em fluxo de água em condição de saturação, diminuiu com o aumento no diâmetro (e no perímetro) da amostra e isso deveria ter provocado diminuição na condutividade hidráulica, assim como o aumento no valor microporosidade e a diminuição da porosidade total. No entanto, observou-se aumento na condutividade hidráulica com o aumento no perímetro, embora as condições do espaço poroso indiquem um aumento na resistência ao fluxo. Isso significa que a água fluiu por espaço de menor resistência, por fluxo preferencial.

Para o solo arenoso houve aumento na macroporosidade e diminuição da microporosidade com o aumento do diâmetro, exceto para a altura de 15 cm. O baixo aumento da condutividade hidráulica com o perímetro indica que o efeito de fluxo

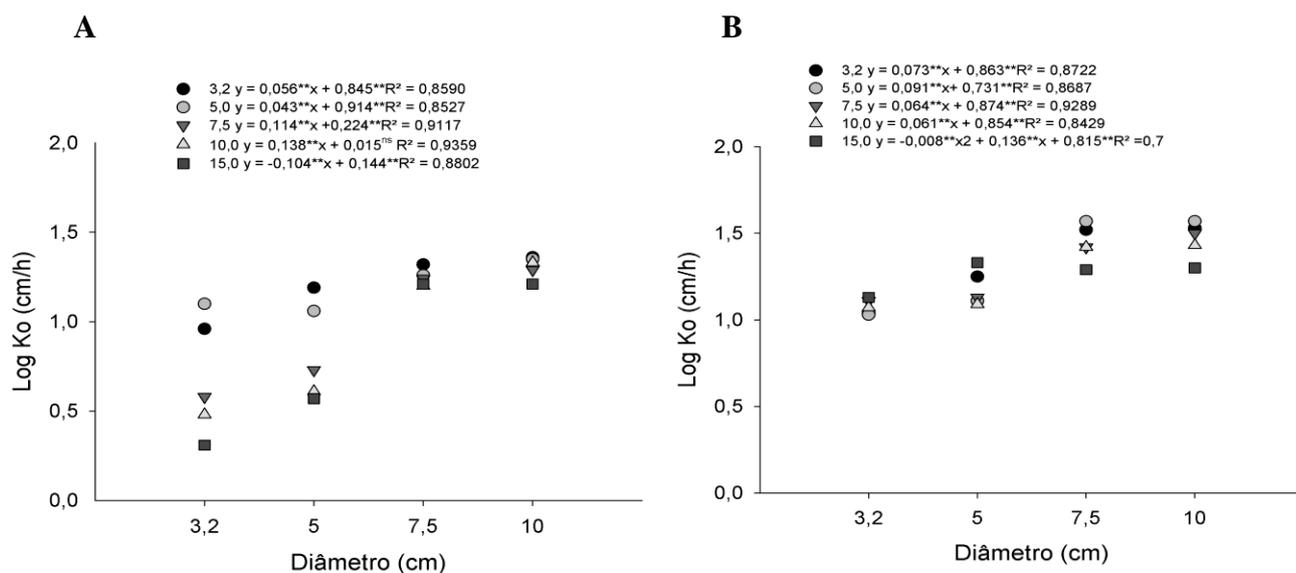
preferencial em solo arenoso é bem menos pronunciado, haja vista à baixa resistência à passagem de água pelo solo, o que não força a água a buscar caminhos menos resistentes.

A altura da amostra não influenciou nos dados de condutividade hidráulica. A tendência geral foi de queda em  $K_o$  com o aumento no percurso que a água deveria percorrer. Esse resultado é esperado, uma vez que, com o aumento na altura da amostra, há uma diminuição no gradiente de potencial, ou seja, na força responsável pelo movimento da água.

É recorrente a afirmação de que em análises que necessitam de amostras confinadas, variações nos valores de condutividade hidráulica do solo saturado podem ocorrer devido à possibilidade de existir cominhos preferencias para a passagem do fluxo entre o solo e a parede do cilindro (MAHESHWARI 1997).

Avaliando esse efeito de forma mais detalhada, observa-se no Gráfico 2 (A e B) o comportamento de  $K_o$  se deu forma linear de acordo com os valores de  $R^2$  da equação exceto para a altura de 15 cm no solo arenoso Gráfico 2 (B), indicando uma resposta forte positiva de  $K_o$  com a variação nos diâmetros dos cilindros dentro de todas as alturas.

Gráfico 2 - Condutividade hidráulica do solo saturado em amostras de volumes variados em função variações nos diâmetro e alturas dos cilindros. Gráficos (A) e (B) representação para as classes texturais argilosa e arenosa, respectivamente.



Analisando as combinações de diâmetro e altura dentro de cada classe de solo, nota-se que houve uma divisão em dois grupos quanto os valores de  $K_o$  para o solo

argiloso Gráfico 2 (A) em que no primeiro grupo representado pela faixa dos menores diâmetros (3,2 e 5,0) cm e menores perímetro de (10,05 e 15,70) combinados com todas as alturas, observou-se os menores valores de  $K_o$ , no entanto um maior afastamento entre eles, quando comparado com os valores de  $K_o$  obtidos pela combinação dos maiores diâmetros, fato este não observado no solo arenoso. Para a faixa de 7,5 e 10 cm de diâmetro combinados com todas as alturas, mesmo que a área disponível para o fluxo preferencial tenha sido aumentado, não gerou dispersão entre os valores de  $K_o$  observados Gráfico 2 (A). Indicando que variações nos valores de  $K_o$  ocorrerem em maior amplitude quando as medições foram tomadas na faixa entre 3,2 e 7,5 cm de diâmetros para o solo argiloso, e com isso aumentando a possibilidade de erros nos valores obtidos decorrente da presença de fluxo preferencial. Comportamento semelhante foi observado Mallants *et al.* (1997), os quais encontram uma distribuição média geométrica nos valores de  $K_o$  mais homogênea em colunas maiores.

## 5 CONCLUSÕES

Os valores de condutividade hidráulica do solo saturado obtidos em amostras confinadas são influenciados pelo aumento no perímetro da amostra.

Para o mesmo aumento de área de fluxo preferencial, o efeito sobre a condutividade hidráulica do solo saturado será maior em solos argilosos.

O aumento no percurso do fluxo da água não foi determinante para as alterações nos valores de condutividade hidráulica do solo saturado, para ambas as classes de solo.

## REFERÊNCIA

- AEBY, P.; FORRER, J.; STEINMEIER, C.; FLÜHLER, H. Image analysis for determination of dye tracer concentrations in sand columns. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v. 61, 33-35. 1997.
- ALLAIRE, S.E.; ROULIER, S.; CESSNA, A.J. Quantifying preferential flow in soil: a review of different techniques. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.378, p.179-204, 2009.
- AMARO FILHO J.; NEGREIROS R.F.D.; ASSIS JUNIOR R.; MOTA J.C.A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo vermelho em Mossoró, RN. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.31, n1, 2007.
- AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; MOTA, J.C.A.; **Física do solo Conceito e Aplicações**. Fortaleza. Imprensa Universitária. 2008.
- ANJOS, J.T.; UBERTI, A.A.A.; VIZZOTO, V.J.; LEITE, G.B.; KRIENGER, M. Propriedades físicas em solos sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa 15 ed, p. 139-145, 1994.
- ARAÚJO, A.G **Estimativa e classificação da compactação do solo pelo tráfego de máquinas agrícolas através da modelagem nebulosa**. 2004. 224 f. Tese (Doutorado Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica de São Paulo. Universidade de São Paulo, São Paulo, (2004).
- BAKER, F.G; BOUMA, J. Variability of hydraulic conductivity in two subsurface horizons of two silt loam soils. **Soil Science Society of America, Proceedings**, v.40, p.219-222, 1976.
- BEAR, J., Dynamics of fluids in porous media. Elsevier, New York. 1972.
- BIASSUSI, M. **Simulação do movimento da água no solo utilizando modelo numérico Porto Alegre**. 2001. 97 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia, Ciência do solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- BORGES, E.; ANTONIO, A.C.D.; DALL’OLIO, A.; AUDRY, P.; CARNEIRO, C. J. G. Determinação da condutividade hidráulica e da sortividade de um solo não-saturado utilizando-se permeâmetro a disco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.11, p.2083- 2089,1999.
- BOUMA, J. Measuring the conductivity o soil horizons with continuous macropores. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.46, n.11, p.438-44, 1982.
- BOUMA, J. Soil morphology and preferential flow along macropores. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.3, p.235-250, 1982.
- BOX GEP; COX DR. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Society**, v.26, p.211-252.1964.

BUCKMAN, H. O.; BRADY, N. C. Natureza e propriedades do solos. Propriedades do solos 6. ed. Rio de Janeiro: **Freitas Bastos**. p. 647. 1983.

CADIMA, A.Z.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. Variabilidade especial da condutividade hidráulica em um Latossolo vermelho-amarelo, textura média, no campo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Campinas, v.4, n.2, p.63-66, 1980.

CARVALHO, L. A. **Condutividade hidráulica do solo no campo: as simplificações do método do perfil instantâneo**. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba. p.86, 2002.

CORRÊA, M.M.; KER, J.C.; MENDONÇA, E.S.; RUIZ, H.A. & BASTOS, R.S. Atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos da região das várzeas de Sousa (PB). **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.27, p.311-324, 2003.

de Rooij, G.H. Modeling fingered flow of water in soils owing to wetting front

DEEKS, L.K.; WILLIAMS, A.G.; DOWD, J.F.; SCHOLEFIELD, D. Quantification of pore size distribution and the movement of solutes through isolated soil blocks. **Geoderma**, v.90, p.65-86, 1999.

DEXTER, A.R.; CZYZ, E, A.; GATE, O. P. Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.79, n.2, p. 185-189, 2004.

DROOGERS, P.; STEIN, A.; BOUMA, J.; DE BOER, G. Parameters for describing soil macroporosity derived from staining patterns. **Geoderma**, v.83, p.293-308, 1998.

EGUCHI, S.; HASEGAWA, S. Determination and characterization of preferential water flow in unsaturated subsoil of andisol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.72, n.2, p.320-330, 2008.

ELLIES, A.; GREZ, R.; RAMIRES, C.G. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta por el diagnóstico de la estructura del suelo. *Agro Sur*, Valdivia, v.5, p.51-56, 1997.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, p.16- 230, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999a. 370p.

FORRER, I.; PAPRITZ, A.; KASTEEL, R.; FLÜHLER, H.; LUCA, D. **Quantifying dye tracers in soil profiles by image processing**. 2000.

FOTH, H. Fundamentos da ciencia del suelo. 3ra impresión. **Compañía Editorial de México**; Ciudad de México, p.433, 1987.

FLINT, A.L. & FLINT, L.E. Particle-size analysis. In: DANE, J.H. & TOPP, G.C., eds. **Methods of soil analysis: Physical methods**. Madison, American Society of Agronomy, 2002. p.235-240.

GARDNER, W.H. Water content. In: KLUTE, A. ed. **Methods of soil analysis. Part I**. Agronomy Monograph Séries no 9, Madison, Winconsin, Cap. 21, p. 493-544, 1986.

GEE, G.W. & OR, D. Particle size analysis. In: DANE, J.H. & TOPP, G.C., eds. **Methods of soil analysis: Physical methods**. Madison, American Society of Agronomy, 2002. p.255-289.

GHODRATI, M.; JURY, W.A. A field study using dyes to characterise preferential flow of water. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.54, p.1558 - 1563,1990.

GROHMANN, F.; VAN RAIJ, B. Dispersão mecânica e pré-tratamento para análise granulométrica de Latossolos argilosos. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Campinas, v.1, p.52-53, 1977.

HENDRICKX, J.M.H.; FLURY, M. Uniform and preferential flow mechanisms in the vadose zone. In: United states national committee for rock mechanics. Conceptual models of flow and transport in the fractured vadose zone. **National Research Council**, Washington, p. 149-187, 2001.

HILLEL, D. **Enviromental soil physics**. New York academic press, Orlando, 1998, 771f.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New YorkAcademic Press, Orlando, 1980.

HURTADO, A. L.B; CICHOTA, R.; JONG VAN LIER, Q. Parametrização do método do perfil instantâneo para a determinação da condutividade hidráulica do solo em experimentos com evaporação **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.29 no.2. 2005.

In: KLUTE, A. (Ed.). Methods of soil analysis I. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. **American Society of Agronomy**, Madison, Cap. 13, p. 210-221, 1965.

instability: a review. **Journal of Hydrology**, v.231, p. 277-294, 2000

JAMIESON, R.C.; GORDON, R.J.; SHARPLES, K.E.; STRATTON, G.W.; MADANI, A., Movement and persistence of fecal bacteria in agricultural soils and subsurface drainage water: a review. **Canadian Biosystems Engineering**. v.44, p.101-109, 2002.

JARVIS, N.J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality. **European Journal of Soil Science**. v.58, p.523-546,2007.

KAISER, H.F. The varimax criterion for analytic rotation in fator anlysis. **Psychometrika**, v.23 p. 187-200, 1958.

KIEHL, E.J. Manual de edafologia: relações solo-planta. São Paulo: Ceres, p262, 1979.

KLAR, A.E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. 2 ed. São Paulo: Nobel, 1988. 83p.

KUNG, K.J.S. Preferential flow in Sandy vadose zone: 1. Field Observation. **Geoderma**, Amsterdam, v. 46, p. 51-58, 1990.

KLEIN, V.A. **Física do solo**. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2008.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não-saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**. Santa Maria. v.32, p.945-953, 2002.

KLUTE, A. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil.

KLUTE, A.; DIRKSEN, C. Hydraulic conductivity and Diffusivity: Laboratory Methods. Methods of soil analysis. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, (Agronomy Monography, 9). pt. 1, p. 691-696, 1986.

KUNG, K.J.S. Preferential flow in a Sandy vadose: 1. Field observation. **Geoderma**, Amsterdam, v.46, p.51-58, 1990.

LAUREN, J.G., WAGENET, R.J., BOUMA, J. AND WIISTEN, J.H.M. Variability of saturated hydraulic conductivity in a Glossaquic Hapludalf with macropores. **Soil Sci**, v.145, p.20-28, 1988.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Edusp, 2005.

LIBARDI, P. L.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O.; TUON, R.L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p.1-12, 1996.

LIMA, J.M.; CURI, N.; RESENDE, M.; SANTANA, D.P. Dispersão do material de solo em água para avaliação indireta da erodibilidade de Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, v.14, p. 85-90, 1990.

LIN, H., ZHOU, X. Evidence of subsurface preferential flow using soil hydrologic monitoring in the Shale Hills catchment. **European Journal of Soil Science**. v.59, 34-49, 2008.

MCDONNELL, J.J. The influence of macropores on debris flow initiation, **Quarterly Journal of Engineering Geology**, London, v.23, p. 325-331, 1990.

MAHESHWARI, B. L. Interrelations among physical and hydraulic parameters of non-cracking soils. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v.68, p. 297-309, 1997.

MALLANTS, D.; MOHANTY, B.P.; VERVOOT, A.; FEYEN. J.; Spatial analysis of saturated hydraulic conductivity on soil with macropores. **Soil Technology**, v.10, p115-131, 1997.

MARQUES, J.D.O.; TEIXEIRA, W.G.; REIS, A.M.; CRUZ JUNIOR, O.F.; MARTINS, G.C.; Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa toposequência com diferentes coberturas vegetais no baixo amazonas. **Acta Amazônia**, Manaus, v. 38(2), p 193-206, 2008

MESQUITA, G.B.F.; MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e os atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n.3, p. 963-969, 2004.

MICHELON, C.J. **Qualidade Física de solos irrigados do Rio Grande do Sul e do Brasil Central**. 2005.p 115. Dissertação de mestrado em Agronomia-Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul. Santa Maria.

MILLAR, A. A. **Drenagem de terras agrícolas**: Bases Agronômicas. São Paulo, p.306, 1988.

MOHANTY, B.P., KANWAR, R.S; EVER & C.J. Comparison of saturated hydraulic conductivity measurement methods for a glacial-till soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison v.58, p.672-677. 1994a.

MONTESINOS, M.G.; CÁMARA, J.M.F.; TOMÉ, J.M.; CÁMARA, M.A.O.; GARCÍA, F.H.; VICENTE, R.M. & DÍEZ, M.B. Número de submuestras necesarias para la obtención de una muestra de suelo representativa. **Agrícola Vergel**, v.241, p.9-18, 2002.

MOONEY, S.J.; HOLDEN, N.M.; WARD, S.M.; COLLINS, J.F. The use of quantified structural descriptors to physically characterise stockpiled milled peat of different genetic origins. **Geoderma**, v. 95, 15 -32. 2000.

MORAES, J. M.; SCHULER, Z.E.; GUANDIQUE, M.E.G.; MILDE, L.C.; GROppo. J.D.; MARTINELLI, L.A.; VICTORIA, R.L.; Propriedades físicas dos solo na parametrização dos modelos hidrológicos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.8, n.1, p. 61-70, 2003.

MOTA, J.C.A.; ALVES, C.V.O.; FREIRE, A.G.; ASSIS JÚNIOR, R.N. Uni and multivariate analyses of soil physical quality indicators of a Cambisol from Apodi Plateau – CE, Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.140, p. 66-73, 2014.

MULLA, D.J.; McBRARNEY, A.B. Soil spatial variability. In: SUMNER, M.E. (Ed.) **Handbook of soil science**. New York: CRC Press, Cap. 9, p.321-352, 2000.

NASCIMENTO, C. D. V.; SILVA, D. M.; SOARES, T. R. V.; ANDRADE, J. C. R. A.; ROMERO, R. E.; SILVA, L. R. D. Avaliação de um argissolo amarelo eutrocoeso típico para a utilização de condicionador zeolítico. **51º Congresso Brasileiro de Química**. São Luiz, 2011. Disponível em: <<http://www.abq.org.br/cbq/2011/trabalhos/13/13-243-11217.htm>> Acesso em 05 de maio de 2015.

PAULETTO, E. A. Determinação da condutividade hidráulica de solos a partir da curva de retenção de água. 1986. 133 f. Tese (Doutorado) - Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

PIMENTA, H. S. **Efeito do sódio trocável, da concentração salina e da relação de adsorção de sódio na condutividade hidráulica de um solo aluvial.** 1991. 95 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

RANDO, E.M. **Alterações nas características e propriedades físicas de um Latossolo Roxo distrófico, ocasionadas pelo cultivo convencional.** 1981. 161p. (Tese de Mestrado). Escola Superior de Agricultura de Lavras, Minas Gerais.

REICHRDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas.** Piracicaba: USP/ESALQ. Depto. Física e Meteorologia, 2 nd ed. Piracicaba, 1996.505p.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera.** Campinas: Fundação Cargill, 268p. 1975.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas.** Editora Manole LTDA. São Paulo, Brasil. p.188, 1990.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações.** 2nd ed. Barueri: Manole, 2012.

REINERT, D.J; REICHERD, J.M; E SILVA, V.R. Propriedades físicas de solos em sistemas de plantio direto irrigado. In CARLESSO, R.; PETRY, M.T.; ROSA, G.M. E CERETTA, CA. Eds. **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul.** Santa Mari, RS, p.165, 2001.

REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E. Measurement and characterization of soil hydraulic properties. In: Álvarez-Benedí, J., Muñoz-Carpena, R. (Eds.), Soil–Water–Solute Process Characterization – An Integrated Approach. **CRC Press**, Boca Raton, FL, USA, p.197–252, 2005.

REZANEZHAD, F.; VOGEL, H.J.; ROTH, K. Experimental study of fingered flow through initially dry sand. *Hydrology and Earth System Sciences*. Munich, v.3, p.2595-2620, 2006.

RUSSO, D.; BRESLER, E. Soil hydraulic properties as stochastic processes: I. An analysis of field spatial variability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison. ed 45, p.682-687, 1981.

SANTOS, P.R. **Atributos do solo em função dos diferentes usos em perímetro irrigado do sertão de Pernambuco.** 2010. 113f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2010.

SILVA, L.P.; OLIVEIRA, L.A.; MIRANDA, J.H.; SANTOS R.S.; FRANCO, E.M. Parâmetros de transporte de nitrato em condições de amostras deformadas e indeformadas de solo sob aplicação de nitrato de cálcio. Anais. In: II INOVAGRI **International Meeting**, Fortaleza CE, p.2325- 2332, 2014.

SIMPSON, T.W.; CUNNINGHAM, R.L. The occurrence of flow channels in soils. *Journal of Environmental Quality*. v.11, p.29-30,1982.

TREVISAN, R.; SALEMI, L.F.; MORAES, J.M.; OLIVEIRA, J.C.M. Condutividade hidráulica do solo saturado na zona vadosa in situ e em laboratório. **Irriga**, Botucatu, v. 14, n. 3, p. 413-422, 2009.

VEIGA, M.; BASSIL, L.; ROSSO, A. Degradação do solo e água: Manual de uso, manejo conservação do solo e da água. Florianópolis. **Secretaria de Agricultura e Abastecimento**, 2. ed. p.384, 1994.

VICINI, Lorena. **Análise multivariada da teoria á prática**. 2005.215 p. Monografia (Especialização em Estatística e Modelagem Quantitativa) – Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

VIEIRA, J.M.; **Contribuição de compostos de baixa cristalinidade e ciclos de umedecimento e secagem na gênese do caráter coeso em solos do Ceará**. 2013. 133p. (Tese de Mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará.

WANG, Z; WU, L; HARTER, T.; LU, J; JURY, W.A. A field study of unstable preferential flow during soil water redistribution. **Water Resources Research**, London, v. 39, n. 4, p. 1-15, 2003.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties the soil. In: HILL, D. (Ed.) Applications of soil physics. New York: **Academic Press**, cap. 13, p. 319-344. 1980.

XLSTAT. Xlstat 2013 add-in for Excel (Trial Version). New York, 2013. Disponível em: <<http://www.xlstat.com>>. Acesso em 29 de maio de 2015.

ZEHE, E.; FLUHLER, H. Preferential transport of isoproturon at a plot scale and a field scale tile-drained site. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.247, p. 100-115, 2001.

## APÊNDICES

**APÊNDICE A – ANÁLISE ESTATÍSTICA DA CONDUTIVIDADE DE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO ( $K_o$ ), MEDIDOS EM CILINDROS DE VOLUMES VARIADOS EM FUNÇÃO DA COMBINAÇÃO DE QUATRO VALORES DE DIÂMETRO E CINCO VALORES DE ALTURA, PARA O SOLO ARENOSO.**

F.V.	G.L.	QUADRADO MÉDIO
		$K_o$
Diametro (A)	3	29,07**
Altura (B)	4	1,30**
Interação (AxB)	12	1,75**
Erro	100	0,06
Total	-	-
C.V.%	-	5,21

\*\* Significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ ); \* Significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ ).

**APÊNDICE B – ANÁLISE ESTATÍSTICA DA CONDUTIVIDADE DE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO ( $K_o$ ), MEDIDOS EM CILINDROS DE VOLUMES VARIADOS EM FUNÇÃO DA COMBINAÇÃO DE QUATRO VALORES DE DIÂMETRO E CINCO VALORES DE ALTURA, PARA O SOLO ARGILOSO.**

F.V.	G.L.	QUADRADO MÉDIO
		$K_o$
Diametro (A)	3	34,64**
Altura (B)	4	7,23**
Interação (AxB)	12	1,08**
Erro	100	0,02
Total	-	-
C.V.%	-	4,43

\*\* Significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ ); \* Significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ ).

**APÊNDICE C – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA MICROPOROSIDADE, OBTIDAS EM CILINDROS DE VOLUMES VARIADOS EM FUNÇÃO DA COMBINAÇÃO DE QUATRO VALORES DE DIÂMETRO E CINCO VALORES DE ALTURA, PARA O SOLO ARGILOSO.**

F.V.	G.L.	QUADRADO MÉDIO
		Micro
Diametro (A)	3	0,002**
Altura (B)	4	0,0002**
Interação (AxB)	12	0,0003**
Erro	100	0,00007
Total	-	-
C.V.%	-	3,26

\*\* Significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ ); \* Significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ ).

**APÊNDICE D – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA MICROPOROSIDADE, OBTIDAS EM CILINDROS DE VOLUMES VARIADOS EM FUNÇÃO DA COMBINAÇÃO DE QUATRO VALORES DE DIÂMETRO E CINCO VALORES DE ALTURA, PARA O SOLO ARENOSO.**

F.V.	G.L.	QUADRADO MÉDIO
		Micro
Diametro (A)	3	0,007**
Altura (B)	4	0,007**
Interação (AxB)	12	0,001**
Erro	100	0,0001
Total	-	-
C.V.%	-	5,34

\*\* Significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ ); \* Significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

**APÊNDICE E – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA MACROPOROSIDADE, OBTIDAS EM CILINDROS DE VOLUMES VARIADOS EM FUNÇÃO DA COMBINAÇÃO DE QUATRO VALORES DE DIÂMETRO E CINCO VALORES DE ALTURA, PARA O SOLO ARGILOSO.**

F.V.	G.L.	QUADRADO MÉDIO
		Macro
Diametro (A)	3	0,0142**
Altura (B)	4	0,0003**
Interação (AxB)	12	0,0006**
Erro	100	0,00007**
Total	-	-
C.V.%	-	2,97

\*\* Significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ ); \* Significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

**APÊNDICE F – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA MACROPOROSIDADE, OBTIDAS EM CILINDROS DE VOLUMES VARIADOS EM FUNÇÃO DA COMBINAÇÃO DE QUATRO VALORES DE DIÂMETRO E CINCO VALORES DE ALTURA, PARA O SOLO ARENOSO.**

F.V.	G.L.	QUADRADO MÉDIO
		Macro
Diametro (A)	3	0,010**
Altura (B)	4	0,007**
Interação (AxB)	12	0,001**
Erro	100	0,0001
Total	-	-
C.V.%	-	3,99

\*\* Significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ ); \* Significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )