

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

EDSON MARLON DA SILVA SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE PERMEÂMETRO PARA DETERMINAÇÃO
DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE SOLOS EM LABORATÓRIO**

RECIFE-PE

2020

Edson Marlon da Silva Santos
Engenheiro Agrônomo

Desenvolvimento de permeâmetro para determinação da condutividade hidráulica de solos em laboratório

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida

Coorientador: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota

Recife
2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica

S237d Santos, Edson Márlon da Silva
Desenvolvimento de permeâmetro para determinação da condutividade hidráulica de solos em laboratório / Edson Marlon da Silva Santos. Recife - 2020.
56 f. : il.

Orientador: Brivaldo Gomes de Almeida.
Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, 2020.

1. Comparação de métodos. 2. Permeâmetro de carga constante. 3. Permeâmetro de carga decrescente. 4. Equipamento alternativo. 5. Equipamento KSAT®. I. Almeida, Brivaldo Gomes de, orient. II. Título

CDD 631.4

EDSON MARLON DA SILVA SANTOS

Desenvolvimento de permeâmetro para determinação da condutividade hidráulica de solos em laboratório

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Aprovada em 31 de Janeiro de 2020

Prof. Dr. Fernando José Freire
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Presidente da Banca Examinadora
(Substituto)

BANCA EXAMINADORA

Profa Dra. Maria Betânia Galvão dos Santos Freire
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dr. Jailson Cavalcante Cunha
Gestor da PlantSoil Laboratórios

DEDICATÓRIA

À Deus e aos meus familiares,
principalmente minha mãe, pelo
incentivo na conquista dos meus
objetivos.

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida, da saúde e pela possibilidade de realizar sonhos;

Aos meus pais, Marili Silva e Elenilson Santos, por terem feito o necessário para me proporcionar uma boa educação, visando sempre à realização dos meus sonhos, principalmente a minha mãe com seu amor incondicional;

Aos meus irmãos, Gleicy Kelly e Elenilson Filho, pelo companheirismo e motivação nas horas de turbulências da vida.

À minha esposa Tamires Silva, pela dedicação em me auxiliar nessa caminhada.

Aos meus filhos Tallys Pietro e Tamar Emanuely por me proporcionarem alegria em todos os momentos, até mesmo nas dificuldades, com os sorrisos mais lindos do mundo.

Aos meus familiares Mirtys, Mayara, Gabriela, Marilene, Marileide, Maria, Willames, André, Vinícius, Lucas, Vitor, Marcos e Cleonice, pelo apoio e incentivo na conclusão desse trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida, pela dedicação, esforço e paciência em me orientar e tornar-me um profissional mais qualificado.

Aos meus co-orientadores Prof. Dr. Fernando José Freire e Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota pelo apoio nas etapas passadas e para as futuras.

À Prof.^a Dr.^a Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida, por auxiliar na orientação das atividades relacionadas a este trabalho, especialmente àquelas referentes ao processo de depósito da patente junto ao Núcleo de Inovação Tecnológica (NIT) da UFRPE.

Aos meus colegas de laboratório, Neura, Eudes, Ana Verena, Ana Paula, José George, Talmo, Aglair, Danilo, Diego, Lucas Azevedo, Gírlayne, Monalisa, pelo companheirismo e auxílio nas atividades de laboratório.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

À Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo – UFRPE;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela concessão da bolsa de estudo

Desenvolvimento de permeâmetro para determinação da condutividade hidráulica de solos em laboratório

RESUMO

A condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) é um dos atributos físico-hídricos do solo mais amplamente usado nos estudos de fenômenos ligados à dinâmica da água no solo. No entanto, seus resultados têm altos coeficientes de variação, que em parte é devido à escolha do método e dos equipamentos para sua determinação. Neste sentido, torna-se importante o uso de equipamentos que determinem a K_{sat} de forma precisa, exata, gerando dados de forma mais rápida e menos onerosa. Dentre os equipamentos disponíveis no mercado poucos atendem, simultaneamente, a estes requisitos. Geralmente, os equipamentos para determinação da K_{sat} em laboratório são fabricados em função da carga hidráulica a ser aplicada ao solo, funcionando como permeâmetro de carga constante (PCC) ou de carga decrescente (PCD), e sua escolha dependerá da textura do solo. Assim, os PCC's são usados para solos de classes texturais mais arenosas; enquanto os PCD's, para as mais argilosas. Por estas especificidades, tem sido um desafio a busca de equipamentos que determinem, alternadamente, a K_{sat} pelos métodos de carga constante e decrescente; mantendo a estrutura da amostra, com resultados que expressem melhor a condição de campo. Assim, esta pesquisa objetivou desenvolver e validar um equipamento alternativo para determinação da K_{sat} de solos em laboratório, onde, num único equipamento, fosse possível definir e realizar ensaios pelos métodos de carga constante e/ou decrescente, com mínima perturbação da amostra; comparando seus resultados com o permeâmetro de Guelph (padrão). Para isso, foram coletadas amostras não deformadas de solos (anéis volumétricos, com $\cong 100 \text{ cm}^3$ e 250 cm^3) com diferentes texturas, para avaliar a sensibilidade do permeâmetro proposto (PP) na determinação da K_{sat} em função do método, tamanho da amostra e classe textural dos solos. Para avaliar o desempenho do PP em estimar os resultados de K_{sat} *in situ*, foram calculados os coeficientes de determinação e variação para os dois métodos (PCC e PCD), tamanho da amostra (100 cm^3 e 250 cm^3) e cargas hidráulicas (constante: 1,5 e 2,5 cca; decrescente, Δh_i : limite superior, $h_1 = 67,6$ e $h_2 = 57,6$ cca; Δh_{ii} : limite médio, $h_1 = 49,3$ e $h_2 = 39,3$ cca; e Δh_{iii} : limite inferior, $h_1 = 31,3$ e $h_2 = 21,3$ cca). Os resultados da K_{sat} dos solos obtidos pelo permeâmetro proposto foram similares aos gerados pelo Guelph ($R^2 > 0,70$), com aproximadamente o mesmo nível de exatidão e precisão; validando seu uso na estimativa da K_{sat} dos solos; agregando adicional tecnológico como PCC e PCD, alternadamente, sem perturbação da estrutura do solo.

Palavras-chave: Permeâmetro de carga constante. Permeâmetro de carga decrescente. Equipamento alternativo. Equipamento KSAT[®]. Dinâmica da água no solo. Permeâmetro de Guelph.

Development of permeameter for determining the hydraulic conductivity of soils in laboratory

ABSTRACT

Saturated hydraulic conductivity (K_{sat}) is one of the physical-hydric attributes of soil most widely used in the studies of the soil water dynamic. However, the K_{sat} values, generally, have high coefficients of variation, which is partly due to the choice of method and equipment determination. In this sense, it is important to use equipment that accurately determines K_{sat} , generating data faster and less cost. Among the equipment available on the market, few get these requirements simultaneously. Generally, the equipment for K_{sat} determination in the laboratory are manufactured according to the hydraulic head to be applied to the soil, functioning as a constant head permeameter (PCC) or falling head permeameter (PCD), and its choice depend on the soil texture. Thus, the PCC's are used for soils of more sandy textural classes and PCD's, for the more clayey textural classes. Due to these specificities, it has been a challenge to search for equipment that alternately determines K_{sat} by constant and falling head methods; maintaining the structure of the sample, with results that better express the field condition. Thus, this research aimed to develop and validate an alternative equipment for the determination of the K_{sat} in the laboratory, where, in a single equipment, it was possible to choose and perform tests by constant and/or falling head methods, with minimal disturbance of the sample; comparing its results with the Guelph permeameter (standard). Thus, undisturbed soil samples (volumetric cores, with $\cong 100 \text{ cm}^3$ and 250 cm^3) with wide textural classes were collected to evaluate the sensitivity of the proposed permeameter (PP) in the determination of K_{sat} according to the method, sample size, and soils textural class. To evaluate the performance of PP in estimating the results of K_{sat} *in situ*, the coefficients of determination and variation for the two methods (PCC and PCD), two samples sizes ($\cong 100 \text{ cm}^3$ and 250 cm^3) and hydraulic heads (constant: 1.5 and 2.5 cwc); falling, Δh_i : upper limit, $h_1 = 67.6$ and $h_2 = 57.6$ cwc; Δh_{ii} : mean limit, $h_1 = 49.3$ and $h_2 = 39.3$ cwc; and Δh_{iii} : lower limit, $h_1 = 31.3$ and $h_2 = 21.3$ cwc) were calculated. The K_{sat} results of the soils obtained by the proposed permeameter were similar to those generated by Guelph ($R^2 > 0.70$), with approximately the same level of accuracy and precision; validating its use in the K_{sat} estimation of soils with the additional technology of the use PCC and PCD, alternately, without disturbance of soil structure.

Keywords: Constant head permeameter. Falling head permeameter. Alternative equipment. KSAT[®] equipment. Soil water dynamic. Guelph permeameter.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Hipóteses	16
1.2 Objetivo geral	16
1.3 Objetivos específicos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3. MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1. Áreas de coleta	22
3.2. Descrição dos perfis estudados	23
3.3. Coleta das amostras e caracterização física dos solos	23
3.4. Análises físicas de caracterização dos solos estudados	24
3.5. Equipamentos utilizados nos ensaios da condutividade hidráulica saturada	25
3.5.1. Equipamento de campo: permeâmetro de Guelph	25
3.5.2. Permeâmetro de laboratório: KSAT [®]	27
3.5.3. Permeâmetro de laboratório proposto	29
3.6. Preparo das amostras para ensaios de condutividade hidráulica	32
3.7. Análises Estatísticas	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1. Caracterização física dos solos estudados e sua influência na Ksat	33
4.2 Condutividade hidráulica saturada: avaliação dos métodos e permeâmetros	36
5. CONCLUSÕES	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1. INTRODUÇÃO

A condutividade hidráulica é uma propriedade que representa a facilidade com que a água permeia o solo. Assim, o valor máximo de condutividade hidráulica é atingido quando o solo se encontra saturado, sendo, portanto definida como condutividade hidráulica saturada (K_{sat}). O estudo da propriedade do solo K_{sat} é de extrema importância para o conhecimento do comportamento da dinâmica da água no solo, podendo ser aplicado para aumentar a eficiência do manejo agrícola, em termos de fertilização, irrigação e drenagem.

Os métodos para determinação da K_{sat} apresentam precisão em diferentes níveis e, são escolhidos de acordo com a textura do solo, sendo de modo geral classificados em métodos diretos ou indiretos. Quando a K_{sat} é estimada por meio de equações de pedotransferência se trata de um método indireto. Nos métodos diretos a K_{sat} é obtida por meio de ensaios que medem diretamente o fluxo da água em um corpo de prova (em laboratório) ou no próprio solo em campo (*in situ*). Para medição em campo um dos métodos mais utilizados é o do permeâmetro de Guelph, enquanto que em laboratório os métodos mais comuns são os de Permeâmetro de Carga Constante (PCC) e do Permeâmetro de Carga Decrescente (PCD). A escolha por um desses métodos (PCC ou PCD) está relacionada ao coeficiente de permeabilidade do solo, em que é recomendado o PCC quando o solo a ser analisado tem maior permeabilidade, no caso de solos com textura mais arenosa e predomínio de macroporos. O PCD, por sua vez é indicado para solos com textura mais argilosa e predomínio de microporos.

Os métodos diretos podem apresentar problemas relacionados ao aprisionamento de ar durante os ensaios no momento da saturação do corpo de prova, principalmente para os métodos de campo. Esses métodos também possuem a desvantagem de serem onerosos na aquisição e manutenção, além de demandar muitos aparatos, como é o caso do KSAT[®]. Ademais, dificilmente possibilitam a utilização dos dois métodos (PCC e PCD) em um mesmo corpo de prova com o mínimo de perturbação e, demandam muito tempo para realização dos ensaios. Para ser considerado eficiente na determinação da K_{sat} em laboratório, o equipamento deve reduzir essas desvantagens e proporcionar eficiência quanto ao uso de água, a redução do tempo das análises, e a produção de resultados precisos e representativos das reais condições do solo, ou seja, podendo ser adotado em análise de rotina como também de pesquisa.

Desse modo, é importante o desenvolvimento de equipamentos alternativos com o propósito de produzir resultados com menor variabilidade e desvio padrão, melhorando suas

características e procedimentos. Dessa forma, esses equipamentos devem apresentar a possibilidade de alternar entre os métodos de carga constante e decrescente, com o mínimo de tempo e de modificações dos aparatos, e, principalmente, mantendo a estrutura original da amostra. As estratégias de aperfeiçoamento dos equipamentos devem estar direcionadas ao atendimento de requisitos como: reduzir o tempo de realização da análise, ampliando o número de amostras por ensaio, gerando assim maior número de dados em menor tempo, além de minimizar as chances de erros durante a realização dos ensaios.

Sendo assim, o presente trabalho se fundamentou no desenvolvimento de um equipamento de laboratório com a finalidade de proporcionar dados precisos e com a minimização das desvantagens apresentadas pelos equipamentos utilizados nesse estudo, capaz de realizar em um mesmo corpo de prova, a determinação da K_{sat} pelos métodos de PCC e PCD, com o mínimo de perturbação, aumentando a representatividade da condutividade hidráulica saturada para os solos estudados.

1.1 Hipóteses

- Os resultados de condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), obtidos em laboratório pelo permeâmetro proposto, não diferem daqueles fornecidos pelo permeâmetro padrão (Guelph), podendo ser usado em substituição aos ensaios de campo;
- A altura da carga hidráulica aplicada ao solo e mantida constante durante os ensaios de laboratório, não influencia os valores da K_{sat} ;
- O tamanho da amostra não influencia os resultados da K_{sat} quando determinados via permeâmetro de laboratório.

1.2 Objetivo geral

Projetar e desenvolver um permeâmetro alternativo para determinação da K_{sat} em ensaios de laboratório, podendo ser utilizado alternadamente nos métodos de carga constante e decrescente.

1.3 Objetivos específicos

- Elaborar desenhos técnicos com a finalidade de projetar o protótipo alternativo para determinação da K_{sat} em laboratório, e descrever seus aparatos, procedimentos de montagem e funcionamento;
- Determinar a K_{sat} em condições de campo, em áreas de solos com diferentes texturas, utilizando o permeâmetro padrão (Guelph), empregando diferentes cargas constantes nos ensaios;

- Determinar a K_{sat} em condições de laboratório, utilizando o permeâmetro alternativo, em amostras estruturadas de solos com diferentes texturas, com tamanhos específicos (100 e 250 cm³), empregando diferentes cargas constantes e decrescentes durante os ensaios;
- Comparar estatisticamente o desempenho nas determinações de K_{sat} dos permeâmetros proposto e Guelph;
- Avaliar a influência da altura da carga hidráulica aplicada ao solo nos ensaios de laboratório, via carga constante e decrescente, nos resultados de K_{sat} , comparando com aqueles obtidos pelo permeâmetro de Guelph

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A condutividade hidráulica é uma das mais importantes propriedades ligadas ao movimento da água do solo (JONG van LIER; LIBARDI, 1999). Segundo Gonçalves e Libardi (2013), a condutividade hidráulica do solo expressa a facilidade com que a água nele se movimenta, sendo de extrema importância ao uso agrícola e, conseqüentemente, à produção das culturas e à preservação do solo e do ambiente. Devido sua importância, se faz necessário o uso de equipamentos que determinem a condutividade hidráulica de forma precisa, mas também que os ensaios para obtenção de seus valores sejam rápidos e de custo mais acessível, possibilitando sua difusão e aplicabilidade nos laboratórios.

A condutividade hidráulica saturada de solos (K_{sat}) é alcançada quando o solo chega ao máximo de sua permeabilidade, ou seja, quando o solo se encontrar saturado (REICHARDT, 1990). A K_{sat} é considerada um dos principais parâmetros para avaliação da intensidade do deslocamento da água no solo (MARQUES et al., 2008), e também utilizada nos cálculos de fluxos de fluidos através dos poros de solos (MESQUITA et al., 2007).

Segundo Alvarenga et al. (2011), a K_{sat} é importante por ser um atributo hidrológico indispensável para determinar um modelo de chuva-vasão, dimensionar sistemas de irrigação, drenagem, lixiviação, recarga de aquíferos e transporte de sedimentos (GONÇALVES; LIBARDI, 2013). Segundo Mesquita e Moraes (2004), os processos de infiltração de água no solo, perdas de fertilizantes e de solo por erosão e de substâncias químicas por lixiviação são relacionados ao fluxo de água, que influencia todo o processo de utilização dos recursos solo e água. Dentre as variáveis que influenciam o fluxo a K_{sat} é a mais importante, pois demonstra as funções do sistema poroso do solo, descrevendo propriedades que estão relacionadas com a sua

porosidade, como morfologia, tamanho, quantidade, continuidade e orientação dos poros (GONÇALVES; LIBARDI, 2013).

Embora todos os aspectos comentados anteriormente enfatizem a importância de se determinar a K_{sat} , seus dados nem sempre são representativos, não refletindo a real dinâmica da água no solo *in situ*. Desse modo, os resultados K_{sat} apresentam alta variabilidade espacial (MARQUES et al., 2008), e em parte isto é devido a falta de eficácia e veracidade dos equipamentos em gerar dados para cálculos da K_{sat} , ou, também, pela perda da estrutura da amostra durante o ensaio, devido às falhas no equipamento, que levam ao fluxo preferencial, aumentando o valor real da K_{sat} . Por outro lado, os equipamentos que satisfatoriamente corrigem tais falhas têm onerosa obtenção.

A respeito disso, pode-se afirmar que o custo dos ensaios em física de solos se apresenta como um fator limitante para determinação de características físico-hídricas de solos em laboratório e no campo, principalmente para a condutividade hidráulica do solo. Além desse fator, outros também são decisivos na escolha do método a ser utilizado, como: a morosidade dos ensaios; a precisão e exatidão dos resultados; e a adequação do método à situação estudada. Com relação a isso, Ghiberto e Moraes (2011) ressaltam a dificuldade na determinação da condutividade hidráulica devido à variabilidade do solo, ao tempo de ensaio, ao custo financeiro, e a histerese envolvida nos processos. Os autores compararam modelos de determinação da condutividade hidráulica e concluíram que os resultados gerados devem ser comparados entre si para o conhecimento do comportamento de cada método e efetivação de sua validação. Sendo assim, dados obtidos por novos métodos, ou a partir de novos equipamentos, devem ser comparados, a fim de verificar a compatibilidade na produção de resultados em diferentes tipos de solo.

Outra característica importante que os métodos de determinação da condutividade hidráulica devem apresentar é o mínimo de perturbação das amostras (BAGARELLO; IOVINO, 2010). Silva e Libardi (2000) afirmaram que perturbações na superfície do solo podem influenciar nos valores da condutividade hidráulica e proporcionar resultados que não representem a população amostral estudada. Essas perturbações geralmente são promovidas tanto nos métodos diretos em campo, quanto nos métodos diretos de laboratório; e o que diferencia entre eles é a intensidade das perturbações. Neste sentido, Gonçalves e Libardi (2013), afirmaram que para quantificar as propriedades físicas do solo é desejável que os métodos e as técnicas utilizadas não provoquem perturbações no próprio solo e favoreçam resultados representativos e de adequada precisão.

Marques et al. (2008), visando a diminuição das fontes de erro nas amostras para determinação da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), comentaram que a forma de coleta das amostras de solos sejam adaptadas ao seu sistema poroso, representando as classes porosas existentes no campo, tendo cuidado na extração e manuseio da amostra para evitar perturbações na sua estrutura, principalmente nos macroporos, pois tais eventos podem influenciar na representatividade das amostras para determinações de reais valores da K_{sat} . Essas características devem ser mantidas em equipamentos alternativos que determinam a K_{sat} em laboratório utilizando amostras coletadas em campo.

Devido a sua importância na determinação da capacidade de transporte de água, solutos e substâncias químicas no solo a K_{sat} deve ser bem caracterizada (MESQUITA; MORAES, 2004). Porém, de acordo com Montenegro e Montenegro (2006), determinar a K_{sat} em grandes áreas é caro, demorado e complexo, pois seus resultados apresentam alta variabilidade espacial. Outros trabalhos também relatam a variabilidade na determinação da K_{sat} . Sobre isso, Marques et al. (2008) comentam que, devido essa alta variabilidade nos valores da K_{sat} em comparação aos menores coeficientes de variação de outras propriedades do solo, como: porosidade, densidade do solo, densidade de partículas, porosidade total, macro e de microporosidade; a determinação da K_{sat} requer muitas medidas, o que aumenta o número de ensaios em campo e em laboratório.

Esse contexto reforça a importância do desenvolvimento de novos métodos para a realização da condutividade hidráulica saturada, na tentativa de tornar mais preciso, exato, rápido e prático suas medições. Apesar de serem requeridas muitas medições da K_{sat} , os métodos disponíveis não apresentam facilidade à precisão nas medições, por serem caras, demoradas, e tecnicamente complexas (MESQUITA; MORAES, 2004). Isso fortalece a necessidade do desenvolvimento de métodos alternativos que agilizem os ensaios da K_{sat} em laboratório.

Os métodos para determinação da K_{sat} apresentam níveis de precisão diferenciados, e são escolhidos em função de determinadas condições do meio poroso ou dos objetivos das análises, sendo de modo geral classificados em métodos diretos ou indiretos.

Nos métodos indiretos a K_{sat} é obtida a partir de equações denominadas de funções de pedotransferência, que relaciona propriedades físicas do solo, como distribuição do tamanho dos poros, porosidade de drenagem, textura, densidade do solo, entre outros. Portanto, para a determinação da K_{sat} por métodos indiretos, devem ser adotadas relações matemáticas e correlações com outras variáveis que influenciam na distribuição dos tamanhos de poros e consequentemente na capacidade de infiltração do solo (KLEIN; LIBARDI, 2002).

Amaro Filho, Assis Junior e Mota (2008), determinaram a K_{sat} em laboratório utilizando métodos indiretos, que foram baseados na correlação entre a K_{sat} e os teores de silte mais argila do solo. Segundo os autores, essa correlação tem se apresentado satisfatória, porém, apenas para solos que têm baixos valores de K_{sat} . Sobre as correlações da K_{sat} com outros atributos do solo, Mesquita e Moraes (2004), estudando a caracterização estatística de variáveis físicas do solo, verificaram que a macroporosidade, parâmetro que influencia a capacidade de infiltração do solo, apresentou coeficiente de variação maior que 70%, o que implicou na maior variação nas determinações da K_{sat} . Os mesmos autores sugerem que, para melhorar a correlação entre essas variáveis, elas devem ser diferentemente distribuídas, adotando-se os logaritmos de K_{sat} e os valores naturais de macroporosidade.

Outros fatores que devem ser elencados, e que também podem influenciar na determinação da K_{sat} por métodos indiretos, são a textura e a estrutura do solo. A K_{sat} depende mais da estrutura do solo do que de sua textura (GONÇALVES; LIBARDI, 2013). A estrutura do solo pode ser modificada pelas práticas culturais, que influenciam mais na K_{sat} do que os processos de gênese e formação do solo (MESQUITA; MORAES, 2004). Isso é uma característica positiva, já que o manejo é controlado, e pode ser realizado de forma a condicionar uma melhor estrutura do solo, e por consequência, melhor K_{sat} (GONÇALVES; LIBARDI, 2013). Silva e Kato (1997) observaram que ocorreu diferenças nos valores de K_{sat} em áreas sob manejo convencional e de plantio direto, mas que estas áreas apresentavam pequenas variações de macroporosidade entre si.

Um solo argiloso pode alcançar valores de condutividade hidráulica semelhantes aos de solos arenosos devido ao efeito da estrutura do solo, principalmente com a presença de poros grandes (GONÇALVES; LIBARDI, 2013), que podem ser produzidos pela biota do solo, que pouco se correlaciona com a textura do solo. Isso indica uma desvantagem dos métodos indiretos, onde se utiliza dados das propriedades do solo para estimar a K_{sat} , que é um processo complexo que engloba todos os fatores que determinam essas propriedades e as relações entre si (STEFANOSKI et al., 2013).

Por outro lado, os métodos diretos também podem apresentar problemas que estão relacionados ao aprisionamento do ar durante os ensaios no momento da saturação do corpo de prova, principalmente para os métodos de campo. Neste caso, o aprisionamento do ar será maior ou menor, dependendo da textura e da estrutura do solo. Solos bem estruturados ou arenosos têm menor aprisionamento de ar; por outro lado, solos argilosos ou compactados podem aprisionar ar com mais facilidade. Os métodos de laboratórios são menos susceptíveis ao aprisionamento do ar, devido o processo lento de saturação da amostra, no sentido de baixo

para cima (MESQUITA; MORAES, 2004); e pelas amostras serem acomodadas ortogonalmente na bandeja de saturação, o que permite a passagem do ar mais facilmente.

Uma desvantagem dos métodos diretos entre si é a medição dos componentes vertical e horizontal da K_{sat} , principalmente quando solos exibem condições anisotrópicas, que é um fenômeno que ocorre em solos que apresentam diferentes padrões de dependência espacial, tendo variabilidade nas medições em diferentes direções (GUEDES et al., 2008). Alguns métodos medem apenas o componente vertical, enquanto outros medem o componente vertical e horizontal. Os métodos de campo geralmente medem os dois componentes, como é o caso do permeâmetro de Guelph (MESQUITA; MORAES, 2004).

Já os métodos de laboratórios medem o componente vertical, podendo medir o horizontal, se a coleta for feita neste sentido; no entanto, cada amostra tem uma direção, e os componentes são medidos de forma isolada, enquanto o permeâmetro de Guelph mede os componentes simultaneamente, permitindo uma melhor representatividade nas medições.

Quando não são possíveis medições com os métodos de campo, o recomendado é a utilização dos métodos de laboratório. Entre eles, os mais utilizados segundo Rodriguez et al. (2015) são os permeâmetros de carga constante (PCC) e os de carga decrescente (PCD). Esses métodos diretos têm a vantagem de, geralmente, apresentarem resultados aproximados entre si (MARQUES et al., 2008), desde que o solo apresente textura dentro da faixa das classes francas (textura média).

A escolha por um desses métodos está relacionada ao coeficiente de permeabilidade do solo. Quando o coeficiente de permeabilidade é baixo, o método que melhor se adequa é o de PCD, recomendado para solos argilosos; e quando o coeficiente de permeabilidade é alto, o método utilizado é o de PCC, recomendado para solos arenosos (RODRIGUEZ et al., 2015). Nesse caso, solos de permeabilidade muito baixa, tornam-se imensuráveis pelo método de carga constante.

Millar (1978) ressaltou que a recomendação para o uso do PCC na determinação da condutividade hidráulica ocorre quando o objetivo é realizar estudos sobre a influência da variabilidade do solo e de suas características como textura, estrutura, compactação, salinidade, qualidade de água, dentre outros, no movimento de água em solo saturado. Na comparação entre métodos de determinação da K_{sat} essas características podem demonstrar diferenças entre eles, evidenciadas a partir da aplicação de técnicas estatísticas nos dados obtidos. Para fins do presente estudo, a propriedade utilizada para verificar essas diferenças será a textura do solo.

Métodos alternativos podem tomar como base as técnicas utilizadas pelos métodos disponíveis, visando obter resultados com menor variabilidade e desvio padrão, aprimorando

as medições e melhorando suas características e procedimentos, como: tempo de execução das medições; praticidade na montagem do equipamento; menor utilização de aparatos e menor custo de fabricação. Se além disso esses métodos apresentarem a vantagem de permutação entre os métodos de carga constante e decrescente, com o mínimo de tempo e de modificações nos aparatos, e, principalmente, mantendo a estrutura original da amostra, será um acréscimo viável à praticidade nas medições de K_{sat} . A respeito disso, Marques, Libardi e Jong van Lier (2002) já ressaltaram que o intenso estudo das propriedades hidráulicas do solo em condições de laboratório e de campo, são atualmente realizados por esses métodos (PCC e PCD) e por diversos outros, mas que, todos apresentam várias limitações.

Desse modo, Gubiani et al. (2010), testando a precisão e a praticidade de equipamentos na determinação da K_{sat} , afirmaram que novas estratégias para sua medição devem atender a requisitos como reduzir o trabalho durante os ensaios, possuir mecanismos para organizar e processar maior quantidade de informações e diminuir as chances de erros. Os autores apresentaram no artigo ensaios sobre a praticidade de três métodos (PCD associado ao programa computacional, PCD com tomada de tempo por meio de cronômetro manual e PCC) em função do tempo de realização dos ensaios; e concluíram que o PCD associado ao programa computacional apresentou redução de 30% do tempo das análises de K_{sat} , além de possibilitar as medições em tempo real. Entretanto, apesar desses resultados, métodos para serem considerados eficientes, como já ressaltado anteriormente, devem atender a requisitos, tais como: menor número de aparatos, menor custos, e, neste caso, a dependência de programas computacionais na geração de dados nos ensaios de quantificação da K_{sat} implica no uso de computadores, que oneram o processo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Áreas de coleta

As amostras foram coletadas na Estação Experimental de Itapirema do Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA), localizado às margens da BR 101 Norte, km 53, Goiana-PE, e no Campus José Ermírio de Moraes, pertencente ao Colégio Agrícola Dom Agostinho Ikas (CODAI), localizado em Tiúma-São Lourenço da Mata-PE, sendo os ensaios realizados no Laboratório de Física do Solo do Departamento Agronomia da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife-PE.

3.2. Descrição dos perfis estudados

Foram selecionados três perfis de solos localizados nas áreas de estudo, sendo: o Perfil 1 classificado como Argissolo Amarelo Eutrocoeso abrupto; Perfil 2, Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico; ambos localizados em São Lourenço da Mata; e o Perfil 3, Argissolo Amarelo Distrocoeso epiáquico, em Goiana-PE. No Perfil 1, foram feitas coletas em dois horizontes, Ap na profundidade de 0-5 cm e Bt1 de 15-29 cm. No Perfil 2, as coletas foram realizadas no horizonte Ap, de 0-12 cm. Já no Perfil 3, as coletas ocorreram no horizonte Ap de 0-15cm e Bt1 de 43-70 cm.

A seleção dos perfis e respectivos horizontes teve o objetivo de se avaliar o desempenho do permeâmetro de laboratório proposto em relação ao permeâmetro de campo (Guelph), de modo que, em cada perfil selecionado, os horizontes apresentassem propriedades físicas contrastantes, tendo-se diferentes valores de densidade do solo (D_s) e textura do solo, como pode ser verificado na Tabela 1, o que, conseqüentemente, proporcionará resultados distintos de K_{sat} .

Além disso, foram utilizadas também as descrições morfológicas dos perfis em campo, para eliminar os locais que apresentavam fluxo preferencial da água nos poros do solo, como ocorre quando da presença de rachaduras, formigueiros, dentre outros.

Tabela 1. Dados de densidade do solo (D_s), e classes texturais dos perfis estudados

	Perfil	Horizonte	Profundidade (cm)	D_s (kg dm^{-3})	Classe Textural
1	ARGISSOLO AMARELO Eutrocoeso abrupto	Ap	0-15	1,33	Franco-arenosa
		Bt1	15-29	1,54	Franco-argilosa
ARGISSOLO					
2	VERMELHO-AMARELO Eutrófico típico	Ap	0-12	1,45	Franco-argilo-arenosa
3	ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso epiáquico	Ap	0-14	1,41	Arenosa
		Bt1	42-70	1,67	Franco-argilo-arenosa

3.3. Coleta das amostras e caracterização física dos solos

Foram coletadas amostras estruturadas, utilizando-se anéis volumétricos distintos: um referenciado como padrão, com altura e diâmetro interno iguais a 5 cm (volume $\cong 100 \text{ cm}^3$); outro, maior, com altura = 5 cm e diâmetro interno = 8 cm, com volume de 250 cm^3 . Os anéis foram inseridos ao solo com auxílio de um amostrador tipo Uhland, mantendo a estrutura do solo com o mínimo de perturbação, de modo a não influenciar os resultados dos ensaios da K_{sat} . No caso para a coleta das amostras destinadas ao equipamento KSAT[®], dimensionado

inicialmente para uso de anel volumétrico com volume de 250 cm³, foi necessário confeccionar um copo coletor extra, a ser adaptado ao amostrador de Uhland, com dimensões distintas de modo a abrigar o referido anel.

As amostras (conjunto anel-solo) foram devidamente envolvidas com plástico filme e bolha, acondicionadas de forma a manter a estrutura da amostra durante o transporte ao laboratório. Tais amostras foram utilizadas nos ensaios com os permeâmetros de laboratório (proposto e KSAT[®]); além dos demais ensaios de caracterização que exigem manutenção da estrutura.

Desse modo, os solos foram caracterizados fisicamente utilizando-se amostras não deformadas para os ensaios da: densidade do solo, condutividade hidráulica saturada e porosidade total. Já para os demais ensaios de caracterização que não exigem a manutenção da estrutura da amostra, tais como obtenção do fator “f” e análise granulométrica, foram utilizadas amostras não estruturadas, coletadas via trado, e, no laboratório, foram convertidas à terra fina seca ao ar (TFSA: amostra seca ao ar, destorroada e passadas em peneiras com malhas de 2 mm de abertura).

O cálculo do número de amostras utilizadas nos ensaios distintos (equipamento de campo e permeâmetros de laboratório) teve como base a alta variabilidade da condutividade hidráulica, utilizando-se o coeficiente de variação (CV) da K_{sat} , que é maior do que os das propriedades que têm influência sobre ela (MESQUITA; MORAES, 2004).

Ainda com relação ao permeâmetro proposto, além dos ensaios com amostras de tamanho padrão (5 × 5 cm), foram usadas também amostras coletadas nos anéis maiores (idênticas ao do KSAT[®]), com objetivo de possibilitar comparações com os dados do KSAT[®], dentro e fora das suas dimensões padrão.

3.4. Análises físicas de caracterização dos solos estudados

A análise granulométrica dos solos foi realizada pelo método do hidrômetro, proposto por Gee e Or (2002), modificado e descrito em Almeida (2008), determinando-se a argila total (AT) com apenas uma leitura no hidrômetro (ASTM 152 H) após dispersão da argila e 24h de repouso da agitação manual, sendo a areia total e suas subfrações obtidas por peneiramento. A fração silte foi calculada pela expressão: % Silte = 100 – (% Areia total + % Argila total). Foram também determinadas as quantidades de argila dispersa em água (ADA), sendo calculados o grau de floculação (GF = ((AT – ADA)/AT) × 100) e de dispersão (GD = 100 – GF).

A densidade do solo (D_s , expressa em g cm⁻³) foi determinada pelo método do anel volumétrico (GROSSMAN; REINSCH, 2002), enquanto a densidade de partículas sólidas do

solo (D_p , em g cm^{-3}) foi determinada pelo método do picnômetro (FLINT; FLINT, 2002). A porosidade total (P , em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) foi calculada a partir da relação entre a D_s e D_p , por meio da equação (1).

$$P = 1 - \left(\frac{D_s}{D_p} \right) \quad (1)$$

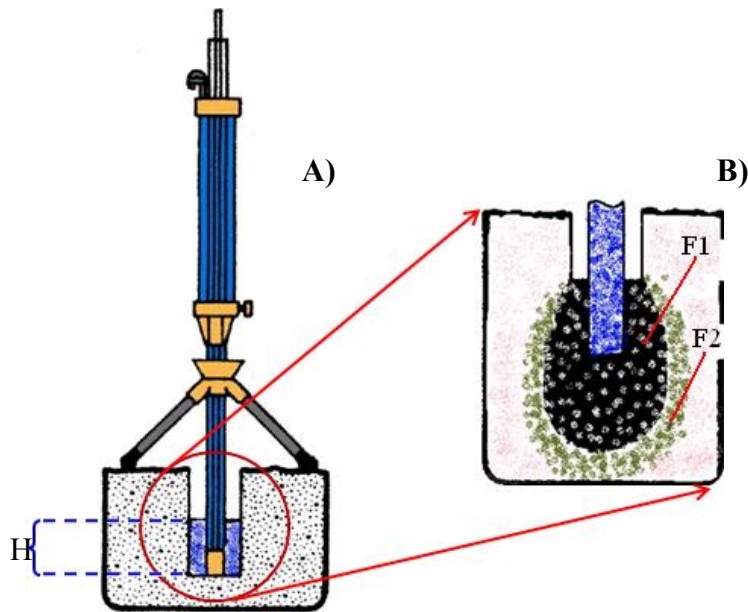
3.5. Equipamentos utilizados nos ensaios da condutividade hidráulica saturada

3.5.1. Equipamento de campo: permeâmetro de Guelph

A determinação da condutividade hidráulica *in situ* pode ser feita na presença ou ausência do leçol freático. O permeâmetro de Guelph é um equipamento que faz medições *in situ* na zona não saturada ou vadosa. Consiste em um permeâmetro de carga constante, que trabalha sob o princípio do tubo de Mariotte, mantendo uma altura constante de água no furo de sondagem, neste caso denominado de “ensaios com um estágio” (ELRICK; REYNOLDS; TAN, 1989). Entretanto, em alguns casos, quando por exemplo se deseja determinar o potencial matricial de fluxo (Φ_{Gm}), há necessidade de se aplicar “dois estágios” (REYNOLDS; ELRICK, 1985), onde uma segunda e maior altura de coluna de água é aplicada após a conclusão do primeiro estágio.

Desse modo, o permeâmetro de Guelph (SOILMOISTURE, 2012; modelo 2800K1, Figura 1) foi usado nos ensaios de campo, seguindo os procedimentos descrito por Elrick, Reynolds e Tan (1989), utilizando-se o método de um estágio, que consiste em aplicar apenas uma altura de coluna de água constante H (carga hidráulica) no furo de sondagem.

O método de um estágio é uma técnica que permite o uso de um número reduzido de ensaios de campo, com satisfatória aproximação do valor real da K_{sat} , fazendo a escolha adequada do parâmetro α , assim como da carga hidráulica (H), fatores que diminuem erros na sua determinação (SOTO; CHANG; ORENCIO, 2009).



Onde:

F1 = frente de molhamento sob condição de saturação;

F2 = frente de molhamento sob condição não saturada, movimentada em função do ϕ_m do solo.

Figura 1. Desenho esquemático dos ensaios de infiltração sobre carga constante via permeâmetro de Guelph, com detalhes em: A) corte lateral destacando a carga hidráulica constante aplicada (H); B) corte lateral do perfil do solo, com destaque para o estabelecimento da carga constante pelas frentes de molhamento F1 e F2. Fonte: Adaptada de Soilmoisture (2012)

Quando o regime permanente é atingido (steady-state), condição onde as leituras do volume infiltrado sob carga hidráulica H mantêm-se constante (Figura 1B), obtém-se a vazão Q e a K_{sat} é calculada pela equação (2).

$$K_{sat} = \frac{CQ}{2\pi H^2 + \pi a^2 C + 2\pi (H/\alpha)} \quad (2)$$

Em que: K_{sat} (LT^{-1}) é a condutividade hidráulica saturada medida *in situ*; Q ($L^3 T^{-1}$) é a vazão à carga constante; H (L) é a carga hidráulica constante (altura da coluna de água) aplicada no furo de sondagem; a (L) é o raio do furo de sondagem; C (-) é um parâmetro denominado “fator de forma”, que depende da relação H/a e do tipo de solo; e α (L^{-1}) é um parâmetro estimado inicialmente a partir da Tabela 2, onde o valor adotado depende de fatores que influenciam a dinâmica da água no solo, como macroporosidade (fissuras, formigueiros, furos de raízes, etc.) e textura do solo.

Tabela 2. Valores do parâmetro α sugeridos por Elrick, Reynolds e Tan (1989),. (1989) em função da macroporosidade e textura do solo

α (cm ⁻¹)	TIPOS DE SOLO
0,01	Argilas compactas (aterros, liners, sedimentos lacustres e marinhos)
0,04	Solos de textura fina, principalmente sem macroporos e fissuras.
0,12	Argilas até areias finas com alta a moderada quantidade de macroporos e fissuras.
0,36	Areia grossa inclui solos com macroporos e fissuras.

Os dados obtidos em campo foram calculados utilizando todos os valores de α , independentemente da estrutura e textura do solo, calculando-se a correlação entre os resultados da condutividade obtida para cada α com os valores de K_{sat} dos outros equipamentos.

Os ensaios foram realizados nos três perfis de solo, nos mesmos horizontes utilizados para coleta em anel volumétrico, destinados aos ensaios de laboratório. A profundidade dos ensaios variou de acordo com a profundidade de cada horizonte, buscando-se realizá-los no intermédio da faixa de profundidade. Para o horizonte Ap dos três perfis a profundidade do poço para o ensaio em campo foi de 5 cm, no horizonte Bt1 do Perfil 2 a profundidade foi de 20 cm, e para o Perfil 3, horizonte Bt1, a profundidade foi de 50 cm. Para cada horizonte foram realizadas 10 repetições para cálculo da média da K_{sat} e para comparação entre os equipamentos estudados.

Durante os ensaios, a variação do nível de água no reservatório (ΔL) do permeâmetro de Guelph foi monitorada em intervalos de 60 segundos (Δt) até atingir o regime permanente (steady-state). O critério adotado para alcançar esse estado consistiu em parar o ensaio quando fosse observado um valor mínimo da razão $\Delta L/\Delta t$ em quatro medições consecutivas.

As cargas hidráulicas foram aplicadas conforme a classe textural dos horizontes, sendo as menores cargas para os de textura mais arenosa; e as maiores, para os de textura mais argilosa. Desse modo, para os horizontes Ap de todos os perfis foi aplicada a carga com 4,5 cca; enquanto para os horizontes Bt1 utilizou-se 12 cca.

3.5.2. Permeâmetro de laboratório: KSAT®

Um dos permeômetros de laboratório utilizados nos ensaios para determinação da K_{sat} foi o KSAT®, fabricado pela empresa METER Group. Conforme literatura, disponibilizada no manual de instruções do fabricante, este é um equipamento que utiliza métodos rápidos e precisos nos ensaios de determinação de K_{sat} , necessitando de poucas medições, por apresentar baixa variabilidade na geração dos dados. O equipamento é integrado a um programa

computacional (KSAT View Software Version: 1.4.2) que registra, em tempo real, as leituras dos dados durante os ensaios. Assim, por meio de uma cúpula de medição, com sensores de temperatura e pressão, tais dados são utilizados nas equações contidas no software para calcular a K_{sat} , que são baseadas na Lei de Darcy (Figura 2).

O método de carga decrescente (PCD) é usado principalmente para amostras de solos com baixa permeabilidade e, dependendo da compactação do solo, necessita de altas cargas hidráulicas. No caso do permeâmetro KSAT®, independentemente da textura do solo e da sua permeabilidade, o modo de carga decrescente é, geralmente, recomendado como método padrão. Neste caso, todo ensaio é realizado de forma automática, sem interferência do operador na geração dos dados. Entretanto, o equipamento permite que os ensaios sejam realizados também pelo método de carga constante (PCC), onde as leituras são realizadas pelo operador, passando a ser um equipamento semiautomático.

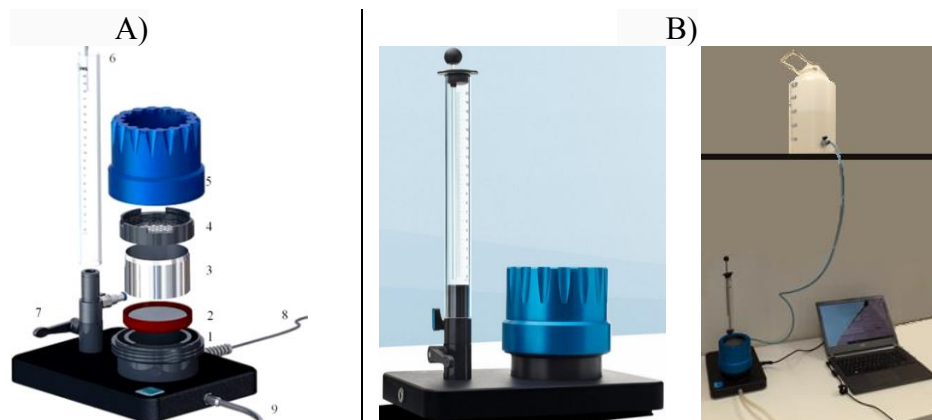


Figura 2. O equipamento padrão utilizado nos ensaios de comparação com o permeâmetro proposto. Detalhes em A) 1. base do equipamento para saturação da amostra; 2. Compartimento de encaixe da amostra; 3. Anel para coleta e acondicionamento da amostra; 4. Tela para fixação da amostra; 5. Recipiente com rosca para fixação do conjunto anel-amostra à base do equipamento (2); 6. Tubo (bureta) para aplicação da carga hidráulica; 7. Controle de fluxo; 8. Cabo de conexão com o computador para transferência dos dados durante os ensaios; 9. Mangueira de alimentação da carga hidráulica. B) Equipamento completo, montado e pronto para os ensaios.

Assim, utilizando-se o software do permeâmetro KSAT®, pode-se calcular a K_{sat} pela equação (3), específica para os métodos que utilizam o PCD [$K_{sat(PCD)}$].

$$K_{sat(PCD)} = \frac{A_{bureta}}{A_{amostra}} \times L \times b \quad (3)$$

em que: A_{bureta} = área transversal da bureta; $A_{amostra}$ = área transversal da amostra; ambas expressas em cm^2 ; L = comprimento da amostra do solo (cm); b = coeficiente da função exponencial ajustado.

No caso da determinação da K_{sat} via KSAT® pelo método de PCC [$K_{sat(PCC)}$], além dos dados acima da equação (3), são necessários os seguintes “dados de entrada” para o software, digitados e quantificados pelo operador: t (s), que é o tempo decorrido entre aplicação das cargas hidráulicas inicial (h_1) e final (h_2), sendo então a $K_{sat(PCC)}$ calculada pela equação (4).

$$K_{sat(PCC)} = \frac{Q}{A_{amostra}} \times \frac{L}{H} \quad (4)$$

em que: Q = taxa de fluxo estacionário (steady-state), expresso em cm^3/dia ; A = área da seção transversal da amostra (cm^2); L = comprimento da amostra (cm); H = diferença entre as cargas hidráulicas final e inicial (cm), valores gravados com a ajuda de leituras manuais do operador.

3.5.3. Permeâmetro de laboratório proposto

O permeâmetro alternativo para determinações da K_{sat} a ser validado foi desenvolvido no laboratório de Física do Solo da UFRPE (Figura 3) é baseado na NBR 13292 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), e, a exemplo do equipamento KSAT®, também tem a capacidade de realizar ensaios pelos métodos de PCC (Figura 3A) e PCD (Figura 3B).

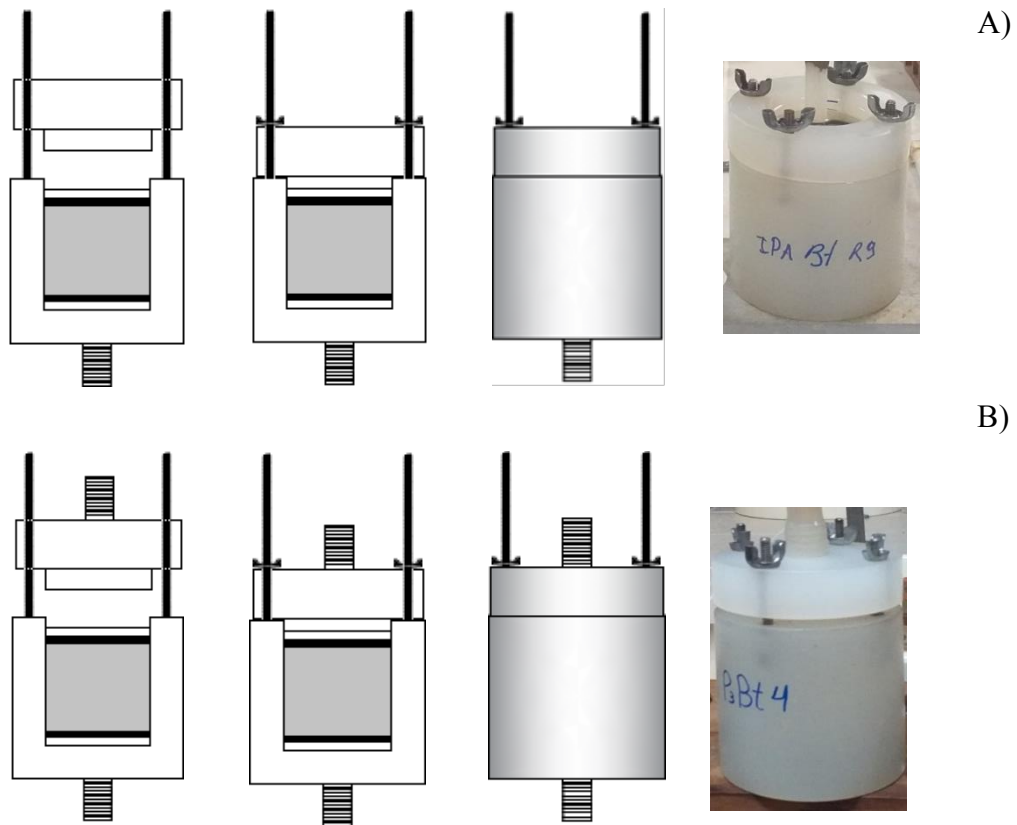


Figura 3. Permeâmetro proposto para ensaios de quantificação da K_{sat} , com detalhes para: A) método de carga constante (PCC); B) método de carga decrescente (PCD)

O equipamento proposto apresenta vantagens em relação ao KSAT®, por ter baixo custo de confecção, ser operado manualmente (sem precisar de energia externa para seu funcionamento), utilizando poucos aparatos, além de realizar um maior número medições em menor tempo.

Para os ensaios pelo método do PCC as amostras foram submetidas à aplicação de carga, em que, após o equilíbrio, foram coletados os volumes de água permeados pela área da seção transversal da amostra, em tempo prefixado, conforme sugeridos por Reynolds e Elrick (1986).

Os dados gerados por este equipamento também foram calculados com base na Lei de Darcy para obtenção final dos resultados da K_{sat} . Desse modo, os cálculos para obtenção dos valores da K_{sat} pelo PCC foram realizados segundo Reynolds e Elrick (1986), com base na equação (5).

$$K_{sat} = \frac{V_a}{A t} \times \frac{L}{L+h} \quad (5)$$

onde: K_{sat} é expressa em cm h^{-1} ; V_a = volume de água coletado (cm^3); L = altura do corpo de prova, assumido com altura do anel (cm); A = área da seção transversal do do corpo de prova, atribuída como a área da seção transversal anel usado na coleta do solo (πr^2), expresso em

cm²;

t = tempo de fluxo da água pelo corpo de prova (horas) e h = potencial de pressão (ϕ_p) aplicado no topo do solo, representado pela coluna de água aplicada (carga hidráulica), expressa em cm.

Tendo-se como objetivo estudar os limites metodológicos do equipamento proposto, com relação a sua sensibilidade em função das alterações nas cargas constantes (CC) aplicadas, foram feitos dois ensaios em cada amostra, variando a CC aplicada: 1,5 cca e 2,5 cca.

Para os ensaios pelo método do PCD a K_{sat} foi determinada seguindo-se os procedimentos sugeridos por Reynolds e Elrick (1986), utilizando-se nos cálculos a equação (6).

$$K_{sat} = \frac{aL}{A \Delta t} \times \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (6)$$

onde: K_{sat} é expressa em cm h⁻¹; a = área da seção transversal do tubo graduado (cm²); A = área da seção transversal do corpo de prova (cm²); Δt = intervalo de tempo de fluxo da água pelo corpo de prova (entre h1 e h2), expresso em horas; h1 = altura inicial do menisco da água no tubo graduado (bureta) ao nível de referência (NR, localizado na base da amostra), expresso em cm; h2 = altura final do menisco da água no tubo graduado (bureta) ao NR (cm).

No caso do uso do permeâmetro proposto pelo método do PCD, avaliou-se também seu desempenho quanto às alterações dos limites metodológicos. Assim, foram feitos ensaios em cada amostra, utilizando-se três cargas hidráulicas (h), que variaram, decrescentemente, entre as posições h1 e h2, porém, mantendo o Δh constante no valor de 10 cm; partindo do pressuposto que isso levaria a obtenção de diferentes valores de K_{sat} . Desta forma, foram avaliadas três situações: i) Limite Superior (LS), definido pela maior altura de h1 (maior altura da carga hidráulica aplicada), representado pela maior distância entre o menisco da bureta (0 mL) e a base da amostra no anel (NR); ii) Limite Médio (LM), onde h1 foi fixado no centro da bureta, sendo h1 representado pela distância intermediária entre o menisco da bureta e o NR; iii) Limite Inferior (LI), definido pela menor altura de h1, representado pela menor distância entre o menisco da bureta e o NR. A posição de h2 em cada um dos casos foi sempre um valor no qual o Δh fosse 10 cm; medindo-se o tempo para que a coluna de água, em cada caso, passasse entre h1 e h2, isto é, o Δt .

Desse modo, foram calculados os valores de K_{sat} pela equação (6) a partir de valores constantes de Δh (10 cm), porém compostos com valores variáveis de h1 e h2, onde: Δh_i representa o Limite Superior (LS), com h1 = 67,6 cca e h2 = 57,6 cca; Δh_{ii} representa o Limite Médio (LM), onde h1 = 49,3 cca e h2 = 39,3 cca; e Δh_{iii} representa o Limite Inferior (LS), sendo h1 = 31,3 cca e h2 = 21,3 cca.

3.6. Preparo das amostras para ensaios de condutividade hidráulica

Os primeiros procedimentos para realizar os ensaios para determinações da K_{sat} em laboratório (independentemente do método a ser usado: PCC ou PCD) é a saturação das amostras, que foi realizada conforme proposto por Mesquita (2001). Neste processo, a água preenche os poros do solo de baixo para cima e de forma lenta, utilizando água desaerada (fervida e resfriada a vácuo até temperatura ambiente), evitando-se assim o aprisionamento de ar durante a saturação.

O tempo de saturação dependerá da textura do solo, sendo mais rápido para os de texturas arenosas, e mais prolongado para os argilosos. O processo de saturação é dado como concluído quando uma lente de água estiver visível na superfície da amostra (amostra com superfície espalhada), podendo ser testada pelo reflexo de luz (por exemplo, de lanterna) direcionada para superfície da amostra.

No caso dos ensaios com o permeâmetro KSAT[®] o manual deste equipamento mostra uma tabela, que foi utilizada nos ensaios, com os tempos de saturação para cada textura. Para padronizar os procedimentos dos ensaios em laboratório, os mesmos tempos foram usados quando da utilização do permeâmetro proposto.

3.7. Análises Estatísticas

A análise estatística dos resultados obtidos em um determinado estudo é uma ferramenta importantíssima na validação desses dados, assim como para a adequada extrapolação dos resultados obtidos para a população estudada. Sendo assim, para a realização de análises estatísticas foram efetuados testes de correlação, ajustando a equação para melhor representar o comportamento das variáveis estudadas. Para avaliar o desempenho do equipamento proposto na determinação da K_{sat} para os perfis estudados, foi calculado a correlação e o coeficiente de variação para os dois métodos de determinação da condutividade hidráulica (PCC e PCD) para os dois tipos de anéis (100 cm^3 e 250 cm^3), bem como para os limites metodológicos do equipamento para os dois métodos: PCD (Limite superior = LS, Limite médio = LM, e Limite inferior = LI); PCC (altura de carga hidráulica $h_1 = 1,5\text{ cm}$ e $h_2 = 2,5\text{ cm}$). Também foi calculado o coeficiente de variação do Permeâmetro de Guelph, para comparação do desempenho com o equipamento proposto. O enquadramento nas classes de variação foi realizado conforme proposto por Warrick e Nielsen (1980), os quais sugerem três classes: variabilidade baixa ($CV < 12\%$), média ($12\% < CV < 60\%$) e alta ($CV > 60\%$).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização física dos solos estudados e sua influência na K_{sat}

Na Tabela 3 encontram-se os dados dos atributos do solo como textura, densidade do solo e porosidade, que são propriedades importantes para as discussões sobre suas influências nos resultados da condutividade hidráulica saturada dos solos (K_{sat}).

Tabela 3. Caracterização física dos perfis estudados

Horizonte	Granulometria ¹											GF ⁸	GD ⁹	D _p ¹⁰	D _s ¹¹	P ¹²
	Argila	Silte	Areia	AMG ²	AG ³	AM ⁴	AF ⁵	AMF ⁶	ADA ⁷	g kg ⁻¹	%					
Ap	183,11	49,61	767,29	141,20	148,36	150,41	168,32	159,00	122,08	33,33	66,67	2,31	1,33	42,42		
Bt1	380,47	256,45	363,07	69,13	72,47	176,43	0,12	44,92	4,07	98,93	1,07	2,61	1,54	41,00		
Ap	224,13	7,76	768,11	132,94	168,39	147,22	198,53	121,03	163,01	27,27	72,73	2,47	1,45	41,30		
Ap	60,22	23,28	916,49	129,29	169,33	246,42	237,54	133,91	20,07	66,67	33,33	2,35	1,41	40,00		
Bt1	301,11	16,19	682,69	26,51	151,48	268,80	200,49	35,41	20,07	93,33	6,67	2,37	1,67	29,54		

¹Método do Densímetro (ALMEIDA, 2008); ²Areia Muito grossa; ³Areia Grossa; ⁴Areia Média; ⁵Areia Fina; ⁶Areia Muito Fina; ⁷Argila Dispersa em Água; ⁸Grau de Flocculação;

⁹Grau de Dispersão; ¹⁰Densidade de Partícula Sólidas do Solo; ¹¹Densidade do Solo; ¹²Porosidade Total do Solo.

Os resultados comprovam que o horizonte Ap do ARGISSOLO AMARELO Eutrocoeso abrupto (Perfil 1) apresenta o maior potencial de infiltração em relação aos demais horizontes, já que possui o maior percentual de areia muito grossa (AMG = 14,12 %), aliado ao menor valor da sua densidade do solo ($D_s = 1,33 \text{ kg dm}^{-3}$), com maior percentual de porosidade total (42,42 %). Estes resultados irão corroborar os maiores valores da K_{sat} do Ap do Perfil 1 em relação aos demais, conforme discutido em mais profundidade **3.2** (Condutividade hidráulica saturada).

Já o horizonte Bt1 do Perfil 1, possui o maior teor de argila total (38,05 %), associado ao menor teor de argila dispersa naturalmente em água (ADA), com 0,41 %, e, conseqüentemente, maior grau de flocculação ($\cong 99$ %); mas, devido sua D_s ser a segunda maior dos solos estudados ($1,54 \text{ kg dm}^{-3}$), sua K_{sat} foi a menor dos solos estudados (ver item **3.2**).

Embora o maior GF do Bt1 do Perfil 1 sugerisse uma melhor condição estrutural desse horizonte, e, conseqüentemente, maiores valores da K_{sat} , seu grau de compactação, avaliado pela D_s , é alto, justificando os baixos valores de K_{sat} deste horizonte.

Com relação ao Perfil 2, classificado como ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico típico, a característica mais marcante do horizonte Ap é sua maior quantidade de ADA ($\cong 16$ %) em relação aos demais horizontes, e também maior valor do GD ($\cong 73$ %); entretanto, estes resultados não interferiram nos valores da K_{sat} , já que esses, medidos em campo pelo Guelph, ficaram na média entre os solos estudados ($15,5 \text{ mm h}^{-1}$).

A respeito do Perfil 3, classificado como ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso epiáquico, nota-se que o horizonte Ap apresentou a maior quantidade de areia total ($\cong 92$ %), sendo este percentual distribuído, principalmente entre as subfrações mais grosseiras (areia muito grossa + areia grossa + areia média), com somatório = 54,5 %, sendo o maior entre os solos estudados. Essa maior quantidade de subfrações grosseiras, aliada ao menor valor de argila total ($\cong 6$ %), corroborou os maiores resultados de K_{sat} obtidos em campo pelo Guelph, com valores médios de $54,9 \text{ mm h}^{-1}$.

Com relação ao horizonte Bt1 do Perfil 3, observa-se comportamento oposto ao seu Ap, pois tem a menor porosidade ($\cong 30$ %), refletindo seu caráter coeso, expresso pela maior D_s ($1,67 \text{ kg dm}^{-3}$), o que pode provavelmente justificar os menores valores de K_{sat} entre os solos, tanto medido em laboratório ($1,49 \text{ mm h}^{-1}$) quando em campo ($1,52 \text{ mm h}^{-1}$).

Desse modo, a dinâmica de água no Perfil 3 pode, entre outros aspectos, ser explicada pelas quantidades de argila total e areia (subfrações) presentes nos horizontes Ap e Bt1, onde sua distribuição ao longo desses horizontes formaram maior ou menor quantidades de macro e

microporos (EMBRAPA, 2017). Neste caso, os maiores valores de areia do Ap contribuíram, provavelmente, para uma maior macroporosidade, favorecendo a maior drenagem e aeração do solo, justificando os maiores valores de K_{sat} deste horizonte.

De fato, como observado por Naveed et al. (2013) a macroporosidade depende diretamente da quantidade de areia do solo, influenciando os valores de K_{sat} . Essa correlação direta entre a macroporosidade e a K_{sat} do solo é esperada e justificada, pois essas propriedades derivam do mesmo espaço poroso do solo (MESQUITA; MORAES, 2004).

Por outro lado, no Bt1 do Perfil 3, os menores valores de K_{sat} podem estar associados à sua quantidade da fração argila total ($\cong 30\%$, segunda maior entre os solos), com alto GF ($\cong 93\%$), mas que, sob condições de alta compactação ($D_s = 1,67 \text{ kg dm}^{-3}$), pelas características do seu caráter coeso, contribuíram para uma provável maior microporosidade, o que diminui a taxa de infiltração neste horizonte, pela sua maior retenção de água.

4.2 Condutividade hidráulica saturada: avaliação dos métodos e permeâmetros

Historicamente, o método de carga decrescente (PCD) é usado principalmente para amostras de solos com baixa permeabilidade e, dependendo da compactação do solo, necessita de altas cargas hidráulicas, já nos casos de solos de texturas mais arenosas, o método mais indicado é o de carga constante (PCC).

Conforme abordado em Mesquita e Moraes (2004), as discussões sobre a validação dos resultados de K_{sat} gerados pelos métodos de laboratório devem ter como base os métodos de campo, pois são considerados na literatura como os que melhor representam a realidade *in situ*, gerando valores mais próximos da real dinâmica da água no solo. Desse modo, esta pesquisa considerou os resultados gerados pelo permeâmetro de Guelph como padrão, confrontando-os com os permeâmetros de laboratório: proposto e KSAT[®].

Com relação aos dados de K_{sat} determinados pelo permeâmetro KSAT[®], divergentes e contraditórios na maioria dos casos, são justificados à erros nos cálculos por “bug” no software, comentados a seguir. Recentemente, a empresa METER Group, fabricante original do referido permeâmetro, foi adquirida por outra que constatou erros no software “KSAT View Software Version: 1.4.2”, utilizado nesta pesquisa para os cálculos da K_{sat} , onde os dados da temperatura da água, usados no momento do ensaio, eram registrados com valores incorretos.

A condutividade hidráulica depende da temperatura, que, por sua vez, influencia os valores da viscosidade da água. Desta forma, no permeâmetro KSAT[®] as medições são realizadas à temperatura ambiente, sendo que um dispositivo mede a temperatura real e calcula os valores de K_{sat} referentes à temperatura de referência selecionada. Esses procedimentos, pela

falha no software, geraram resultados da K_{sat} não conviáveis. Tais informações foram obtidas via email, enviado pela atual empresa para todos que adquiriram o permeâmetro KSAT[®].

Assim, o setor técnico da atual empresa sugere que os ensaios com o permeâmetro KSAT[®] sejam refeitos, utilizando o novo software (KSAT_v1.5.0, com site para download em: https://downloads.metergroup.com/software/KSAT_v1.5.0.exe), pois, mesmo de posse dos dados de leitura com o antigo software, estes não podem ser corrigidos, a não ser com novos ensaios, já que o equipamento registra as leituras das coletas de dados em tempo real. Entretanto, como as amostras já tinham sido descartadas, e o prazo para a defesa próximo do seu término, não foi possível refazer tais ensaios.

Desse modo, os dados dos ensaios pelo permeâmetro KSAT[®] não são apresentados nas Tabelas 4 e 5, mas, mantidos na Tabela 6, como forma de comprovação que tais dados apresentaram variabilidade acima do esperado na literatura, sem uma lógica efetiva, com amplitude inexplicável, a não ser pela falha no software.

Por estes motivos, nas discussões subsequentes será dado mais ênfase na comparação entre os dados gerados pelo equipamento proposto (a ser validado) *versus* o permeâmetro de Guelph (considerado padrão).

Tabela 4. Valores médios da condutividade hidráulica saturada dos solos obtidos pelos permeâmetro proposto (PCC e PCD), utilizando-se amostras em anel padrão (100 cm³), e permeâmetro de Guelph (PCC)

Perfil	Horizonte	Classe Textural	Equipamento / Método					
			Proposto via		Proposto via PCD			Guelph
			ϕ_{p1}^a	ϕ_{p2}^b	Δh_i^c	Δh_{ii}^d	Δh_{iii}^e	PCC ^f
Ksat (mm h ⁻¹)								
1	Ap	Franco-argilosa	15,93	14,71	49,83	49,07	75,38	30,00
	Bt1	Franco-argilosa	1,96	2,31	6,32	3,69	4,20	2,92
2	Ap	Franco-argilo-arenosa	12,21	11,76	11,28	12,08	16,37	15,5
3	Ap	Arenosa	8,37	9,34	10,78	10,01	14,12	54,90
	Bt1	Franco-argilo-arenosa	1,44	1,53	2,64	2,77	4,08	1,52

^a Carga hidráulica constante aplicada = 1,5 cca; ^b Carga hidráulica constante aplicada = 2,5 cca; ^c Carga hidráulica decrescente aplicada com Δh_i = Limite Superior, onde $h_1 = 67,6$ cca e $h_2 = 57,6$ cca; ^d Carga hidráulica decrescente aplicada com Δh_{ii} = Limite Médio, onde $h_1 = 49,3$ cca e $h_2 = 39,3$ cca; ^e Carga hidráulica decrescente aplicada com Δh_{iii} = Limite Inferior, onde $h_1 = 31,3$ cca e $h_2 = 21,3$ cca; ^f Média para a carga hidráulica constante aplicada, com 4,5 cca, para os horizontes Ap de todos os perfis; e 12 cca, para os horizontes Bt1 dos perfis 1 e 3.

Tabela 5. Valores médios da condutividade hidráulica saturada dos solos obtidos pelos permeâmetro proposto (PCC e PCD), utilizando-se amostras em anel grande (250 cm³), e permeâmetro de Guelph (PCC)

Perfil	Horizonte	Classe Textural	Equipamento / Método					
			Proposto via PCC		Proposto via PCD			Guelph PCC ^f
			ϕ_{p1}^a	ϕ_{p2}^b	Δh_1^c	Δh_2^d	Δh_3^e	
			Ksat (mm h ⁻¹)					
1	Ap	Franco-	0,62	1,08	1,87	1,97	2,45	30,00
	Bt1	Franco-	0,36	0,73	1,27	1,42	1,41	2,92
2	Ap	Franco-argilo-arenosa	0,73	1,34	0,92	1,01	1,56	15,5
	Ap	Arenosa	120,87	126,13	19,64	23,61	29,50	54,90
3	Bt1	Franco-argilo-	4,16	5,54	5,86	6,79	9,91	1,52

^a Carga hidráulica constante aplicada = 1,5 cca; ^b Carga hidráulica constante aplicada = 2,5 cca; ^c Carga hidráulica decrescente aplicada com Δh_i = Limite Superior, onde $h_1 = 67,6$ cca e $h_2 = 57,6$ cca; ^d Carga hidráulica decrescente aplicada com Δh_{ii} = Limite Médio, onde $h_1 = 49,3$ cca e $h_2 = 39,3$ cca; ^e Carga hidráulica decrescente aplicada com Δh_{iii} = Limite Inferior, onde $h_1 = 31,3$ cca e $h_2 = 21,3$ cca; ^f Média para a carga hidráulica constante aplicada, com 4,5 cca, para os horizontes Ap de todos os perfis; e 12 cca, para os horizontes Bt1 dos perfis 1 e 3.

Pode-se observar que os métodos produziram diferentes valores de K_{sat} , como era de se esperar e já consolidado na literatura (MESQUITA; MORAES, 2004; GUEDES et al., 2008; RODRIGUEZ et al., 2015). De fato, a K_{sat} é um dos parâmetros físico-hídricos que apresenta maiores coeficiente de variabilidade, pois seus valores são extremamente influenciados pelo tamanho da amostra, geometria de fluxo, processo de coleta da amostra (BAGARELLO; PROVENZANO, 1996) e demais atributos do solo (D_s , P , distribuição das frações granulométricas, dentre outros), como observado em Mesquita e Moraes (2004). Por outro lado, a variação entre medidas de laboratório e campo pode ser devida às diferenças inerentes de cada método.

A respeito disso, os métodos de carga constante (PCC) são indicados para solos de textura mais arenosa; já os de carga decrescente (PCD) geram valores mais reais para solos argilosos. O uso de um método inadequado para um solo com textura distinta, poderá, provavelmente, levar a erros na medição da K_{sat} . Por outro lado, para solos com texturas médias, o método selecionado pode interferir pouco nos resultados, pois, neste caso, a textura não é extrema (areia ou muita argilosa).

Portanto, ao observar os resultados das Tabelas 4 e 5, pode-se concluir que, devido os solos apresentarem texturas diferentes, a padronização por um método (PCC) ou outro (PCD) pode explicar as grandes discrepâncias entre os valores. Neste sentido, nota-se que as maiores divergências entre o método de campo (Guelph) e de laboratório (proposto), foram observadas

quando se usou o PCD, possibilidade restrita aos permeâmetros de laboratório, pois o Guelph é um permeâmetro de carga constante, o que explica a não correlação entre os valores de K_{sat} , com maiores diferenças quando se usou o anel maior (Tabela 5) em relação ao menor (Tabela 4).

Os resultados da Tabela 4 mostram que os valores de K_{sat} determinados nos anéis padrão ($\cong 100 \text{ cm}^3$), independentemente da carga hidráulica aplicada, ficaram mais próximos aos daqueles determinados pelo Guelph. Entretanto, quando os resultados foram gerados pelas amostras coletadas nos anéis maiores (250 cm^3), seus valores de K_{sat} foram bem menores que os determinados em campo pelo Guelph, como também daqueles com anéis de 100 cm^3 .

Estes resultados, de certa forma, discordam dos encontrados em Bargarello e Provenzano (1998). Esses autores comprovaram que os resultados de K_{sat} gerados por permeâmetro de laboratório são influenciados pelo tamanho da amostra do solo; onde amostras “maiores” produziram estimativas de K_{sat} mais baixas e menos variáveis quando comparadas com amostras “menores”, nas quais o potencial para fluxo preferencial aumenta muito. Neste caso, o permeâmetro usado na pesquisa era do tipo tradicional, com montagem artesanal, com saturação das amostras à parte, que depois eram transferidas para o permeâmetro. Estes procedimentos perturbam a estrutura da amostra, levando a rachaduras e fluxo preferencial da água nos ensaios, aumentando o valor da K_{sat} , fatos comprovados na literatura (MARQUES et al., 2008; GONÇALVES; LIBARDI, 2013).

No caso dos resultados da Tabela 4, o permeâmetro de laboratório usado nos ensaios é um equipamento, onde os procedimentos de saturação e determinação da taxa de infiltração ocorrem no próprio equipamento, sem a necessidade de manuseio da amostra durante todo o processo, mesmo que seja necessária a mudança de método, alternando entre PCC e PCD. Estes fatos justificam os maiores valores de K_{sat} das amostras coletadas em anéis com volume de $\cong 100 \text{ cm}^3$ (Tabela 4), que estão mais próximos dos dados gerados pelo Guelph, quando comparados com os resultados das amostras maiores ($\cong 250 \text{ cm}^3$), listados na Tabela 5.

Entretando é possível questionar: porque não usar essas justificativas em relação aos dados da Tabela 5, com as amostras maiores? A resposta recai, mais uma vez, na perturbação da amostra, com perdas da sua estrutura original. De fato, a sequência dos ensaios, utilizando as amostras maiores foi: 1. determinação pelo permeâmetro KSAT[®], usando o método de carga constante; 2. determinação pelo permeâmetro KSAT[®], usando o método de carga decrescente; e 3. Remoção da amostra do KSAT[®], e montagem no permeâmetro proposto. Esses processos,

que levam a perturbação do corpo de prova, justificam os menores valores de K_{sat} mostrados na Tabela 5.

Em relação aos ensaios de campo, o permeâmetro de Guelph mede o fluxo da água através dos poros do solo, considerando a componente horizontal e a vertical, e sob condições anisotrópicas: o fluxo no sentido vertical é diferente do que ocorre na horizontal. Já os métodos de laboratório utilizados nesta pesquisa, embora seja o mais comum o uso de amostra coletadas no sentido vertical, os dados por eles gerados não avaliam a movimentação da água no sentido horizontal, considerando-se, portanto, que o fluxo é isotrópico (é igual em todas as direções: horizontal e vertical), como observado em Guedes et al. (2008).

Desse modo, para a discussão dos dados foi necessário avaliar a correlação da textura do solo e sua influência nos fenômenos de isotropia e anisotropia em relação à movimentação da água nos sentidos horizontal e vertical; observando-se na Tabela 6, considerando também os resultados da K_{sat} determinada pelo permeâmetro KSAT[®].

Tabela 6. Razão entre os valores médios da condutividade hidráulica saturada obtida entre os pares de permeâmetros: Guelph e Proposto; Guelph e KSAT[®], referentes ao método de carga constante (PCC)

Perfil	Horizonte	Granulometria			Razão entre os pares de permeâmetros ¹	
		Areia	Silte	Argila	Guelph/Proposto ²	Guelph/KSAT [®]
		%				
1	Ap	76,73	4,96	18,31	1,96	12,3
	Bt1	36,31	25,64	38,05	1,37	1,8
2	Ap	76,81	0,78	22,41	1,29	2,1
3	Ap	91,65	2,33	6,02	6,20	0,6
	Bt1	68,27	1,62	30,11	1,02	0,2

¹ Valores calculados pela fração entre o permeâmetro de Guelph e cada permeâmetro de laboratório, para o método de carga constante (PCC); ² Valores médios entre as duas cargas hidráulicas aplicadas: $\phi_{p1} = 1,5$ cca; $\phi_{p2} = 2,5$ cca).

Nota-se que os dados da Tabela 6 indicam valores mais altos para a K_{sat} determinada pelo Guelph, quando comparados com aqueles obtidos permeâmetro proposto; entretanto as diferenças variaram entre um fator de 1 a 2, exceto para o Ap do Perfil 3, com fator máximo de $\cong 6$. Essa baixa amplitude de variação para a maioria dos dados (razão entre 1 e 2) comprova que os resultados da K_{sat} determinada em condições de laboratório foram praticamente iguais, ou duas vezes menores que os de campo. No caso do Perfil 3, horizonte Ap, onde a relação foi $\cong 6$, pode-se observar que este horizonte foi o que apresentou a textura mais arenosa, com teor de areia igual a 91,65%. Este fato explica a maior diferença entre os dados de campo via Guelph,

com K_{sat} de 54,90 mm h⁻¹ e de laboratório, com resultados do permeâmetro proposto igual a 8,37 mm h⁻¹ (Tabela 4).

Neste caso, os maiores valores do Guelph pode ser explicado pelo fato da carga hidráulica aplicada no ensaio (Figura 1B) ser toda distribuída no sentido vertical, onde, em solos muito arenosos, a frente de molhamento, sob condição de saturação (Figura 1A), a componente horizontal, que é comandada pelo potencial mátrico (ϕ_m), é pouco expressiva, já que em solo arenosos o ϕ_m é baixo, contribuindo pouco para a movimentação da água lateralmente. Assim, quando a carga constante é atingida, a componente vertical comandará o fluxo, principalmente pela ação da gravidade (potencial gravitacional: ϕ_m), fazendo com que o fluxo aumente nessa direção, o que, proporcionalmente, aumentará os valores da K_{sat} em condições de campo.

Ainda em relação Perfil 3 Ap, essa maior diferença observada para os valores ea K_{sat} entre os perpeâmetros Guelph e proposto pode ser considerada normal, pois, mesmo sendo um equipamento padrão, os ensaios com o Guelph, geralmente, fornecem valores de K_{sat} mais altos em comparação aos outros equipamentos que realizam ensaios de campo.

Este fato é bem discutido em Lanoix, Pabst e Aubertin (2020), que comprovaram maiores valores de K_{sat} pelo Guelph em relação aos gerados por infiltrômetros de campo, tanto do tipo anel simples como duplos (anéis concêntricos). Os autores ainda comentam que esses resultados refletem a geometria de infiltração dos ensaios com Guelph, que é específica para cada textura do solo estudado, sendo tridimensional para solos mais argilosos, e praticante na direção vertical, para os arenosos. Apesar disso, os autores concluem que os três equipamentos podem ser utilizados para a determinação da K_{sat} com o mesmo nível, aproximadamente, de exatidão e precisão.

Para verificação do desempenho do permeâmetro proposto foram calculadas as correlações entre os equipamentos, considerando as diferentes cargas hidráulicas aplicadas aos solos. Isso permitiu verificar o desempenho de cada equipamento para cada horizonte, e sua sensibilidade em detectar as possíveis diferenças entre os valores de K_{sat} em função das cargas aplicadas. Nesta pesquisa, os valores de R^2 acima de 0,70 foram considerados como correlações satisfatórias para estimativa dos valores de K_{sat} em campo pelo permeâmetro proposto, sendo, portanto o limite crítico adotado para sua validação.

A análise dos dados da Tabela 7 mostra que os valores de K_{sat} determinado pelo permeâmetro proposto, estimam o valor real obtido pelo Guelph com exatidão maior que 70 %, exceto para o horizonte Ap do Perfil 1, com $R^2 = 0,67$ (amostras referentes ao anel de $\cong 100$ cm³, e menor carga hidráulica: $\phi_{p1} = 1,5$ cca). Considerando apenas as amostras dos anéis de $\cong 100$

cm³, mas sob carga maior ($\phi_{p2} = 2,5$ cca), o Perfil 1 Ap também apresentou menor R² entre os solos, embora com valor acima do limite crítico (0,73).

Esses resultados podem estar associados ao maior potencial de infiltração desse horizonte em relação aos demais, pois apresentou maior percentual de areia muito grossa, aliado ao maior valor de porosidade total, tendo a menor densidade do solo. Estes atributos físicos condicionam a dinâmica da água nesse horizonte (principalmente nas condições de campo), que é comandada pelo maior fluxo na direção da componente vertical, podendo promover maiores diferenças entre os valores de K_{sat} determinados pelo Guelph em relação aos permeâmetros de laboratório.

Tabela 7. Coeficientes de determinação (R²) para os resultados de K_{sat} dos solos via Guelph, aplicando o fator de forma 2, e permeâmetro proposto, utilizando o PCC, nos anéis de 100 cm³ e de 250 cm³, sob cargas hidráulicas $\phi_{p1} = 1,5$ cca e $\phi_{p2} = 2,5$ cca

Carga Hidráulica	Perfil 1		Perfil 2	Perfil 3	
	Ap	Bt ₁	Ap	Ap	Bt ₁
__ cca __	Guelph (fator 2) × PCC (anel pequeno)				
	R ²				
$\phi_{p1} = 1,5$	0,67	0,93	0,87	0,78	0,94
$\phi_{p2} = 2,5$	0,73	0,79	0,91	0,81	0,94
	Guelph (fator 2) × PCC (anel grande)				
	R ²				
$\phi_{p1} = 1,5$	0,86	0,88	0,98	0,89	0,91
$\phi_{p2} = 2,5$	0,94	0,88	0,88	0,91	0,95

A respeito disso, Pinheiro, Nummmer e Rauber (2017) comentam que os ensaios de campo para determinação da K_{sat} são mais representativos em relação aos de laboratório, pois envolvem uma massa maior de solo, o que permite contemplar a heterogeneidade e anisotropia dos solos que ocorrem *in situ*.

Em relação aos maiores valores de R², de um modo geral, estes foram observados nos horizontes Bt, independentemente do tamanho da amostra (Tabela 7). Estes horizontes foram os que registraram maiores valores de D_s, sendo 1,54 kg dm⁻³ para o Perfil 1 e 1,67 kg dm⁻³ no Perfil 3 (Tabela 3), apresentando maiores compactação, principalmente no Perfil 3, com porosidade muito baixa (29,54 %). Neste caso, altos R² indicam menores diferenças entre os valores de K_{sat} determinados pelo Guelph e em laboratório, provavelmente pela diminuição da anisotropia, definida como a dependência direcional das propriedades físicas e mecânicas de

solos (ROWSHANZAMIR; ASKARI, 2010). Neste caso, as diferenças no comportamento da dinâmica da água em todas as direções passam a ser mínimas ($K_{sat \text{ Vertical}} \cong K_{sat \text{ Horizontal}}$)

De fato, segundo Khan, Nakai e Noda (2020), que pesquisaram o desenvolvimento/diminuição da anisotropia e seu efeito no comportamento mecânico em solos argilosos, a compactação diminui o comportamento anisotrópico do solo, isto é, o solo passa a ser mais isotrópico (quando ocorre a igualdade do comportamento do parâmetro estudado em todas as direções). Nestas condições, os valores de K_{sat} determinados em campo tendem aos do laboratório, como os resultados observados para os horizontes Bt nesta pesquisa. Neste caso, em solos mais compactados, a sua estrutura apresentará um arranjo com menor presença de macroporos (como os bioporos), ou mesmo ausência, quando os efeitos desses poros no comportamento anisotrópico dos solos quase desapareceram (ROWSHANZAMIR; ASKARI, 2010).

Com base nos altos valores de R^2 da Tabela 7, comprovando a validação do permeâmetro proposto, como PCC, em estimar os valores de K_{sat} obtida em campo (Guelph), a próxima etapa da pesquisa foi fazer abordagens adicionais de validação, avaliando o desempenho do equipamento proposto, porém agora como PCD. Para tanto, a Tabela 8 mostra as comparações entre o PCC e o PCD, no sentido de detectar alterações nos valores da K_{sat} em função da carga hidráulica aplicada às amostras, utilizando-se o tamanho padrão para tais ensaios (anel volumétrico com volume $\cong 100 \text{ cm}^3$).

Tabela 8. Coeficientes de determinação (R^2) para os resultados de K_{sat} dos solos via permeâmetro proposto, anéis de 100 cm^3 , utilizando o PCC, sob carga hidráulica $\phi_{p1} = 1,5 \text{ cca}$, e o PCD, aplicando variação da carga hidráulica decrescente, sob os limites superior, médio e inferior

Perfil 1		Perfil 2	Perfil 3	
Ap	Bt ₁	Ap	Ap	Bt ₁
PCC ($\phi_{p1} = 1,5 \text{ cca}$) \times PCD (limite superior)				
R^2				
0,95	0,90	0,87	0,78	0,91
PCC ($\phi_{p1} = 1,5 \text{ cca}$) \times PCD (limite médio)				
R^2				
0,95	0,87	0,89	0,79	0,90
PCC ($\phi_{p1} = 1,5 \text{ cca}$) \times PCD (limite inferior)				
R^2				
0,87	0,97	0,92	0,75	0,90

Pode-se observar que os valores de R^2 para os resultados de K_{sat} foram altos ($\geq 0,75$), e maiores que o limite crítico adotado nesta pesquisa como base para validação dos resultados produzidos pelo permeâmetro proposto (0,70).

Os menores valores de R^2 foram observados no horizonte Ap do Perfil 3 (0,75 a 0,79), independentemente da variação da carga hidráulica aplicada, decrescentemente, via PCD. Este horizonte, como já comentado, tem o maior percentual de areia entre os solos estudados, com 91,65%, onde a retenção de água é muito baixa, e a ação da gravidade (potencial gravitacional da água: ϕ_g) comanda a infiltração. Nestas circunstâncias, a condutividade hidráulica é altamente influenciada pela altura da coluna de água sobre o solo, e os valores de K_{sat} aumentam proporcionalmente à carga hidráulica aplicada. Por estes motivos, a literatura recomenda que os ensaios de K_{sat} em solos arenosos devem ser realizados pelo método do PCC, não recomendando o PCD, que tende a superestimar os valores de K_{sat} (RODRIGUEZ et al., 2015).

Por outro lado, o Perfil 1 foi o que mostrou melhores correlações entre os ensaios de K_{sat} via PCC *versus* PCD, principalmente no horizonte Ap, quando do uso das cargas sob limite superior e médio (ambos com $R^2 = 0,95$); e, na carga sob o limite inferior, horizonte Bt, que apresentou o maior R^2 (0,97). O horizonte Ap, com base nos seus atributos físicos, com maior porosidade e menores D_s e D_p (Tabela 3), além da sua distribuição das frações granulométricas, que conferem a textura da classe franco-arenosa (Tabela 1), é o horizonte que apresenta melhor qualidade estrutural, condicionando a geometria dos poros (RAMOS et al., 2015), e essa combinação de características do solo reflete os maiores valores de K_{sat} desse horizonte (DEC et al., 2008).

O maior valor de R^2 , registrados para os ensaios no Perfil 1, horizonte Bt, reforça o comportamento isotrópico desse horizonte (*in situ* e em laboratório), citado anteriormente quando das discussões dos dados da Tabela 7, mesmo sob condições de carga decrescente (Tabela 8).

Uma terceira abordagem de validação do permeâmetro proposto avaliou as condições de ensaios apresentados na Tabela 8 (PCC *versus* PCD, em anéis com $\cong 100 \text{ cm}^3$), porém utilizando amostras maiores, coletadas via anéis volumétricos com 250 cm^3 (Tabela 9).

Tabela 9. Coeficientes de determinação (R^2) para os resultados de K_{sat} dos solos via permeâmetro proposto, anéis de 250 cm^3 , utilizando o PCC, sob carga hidráulica $\phi_{p1} = 1,5\text{ cca}$, e o PCD, aplicando variação da carga hidráulica decrescente sob os limites superior, médio e inferior

Perfil 1		Perfil 2	Perfil 3	
Ap	Bt ₁	Ap	Ap	Bt ₁
PCC ($\phi_{p1} = 1,5\text{ cca}$) × PCD (limite superior)				
R^2				
0,98	0,93	0,97	0,97	0,89
PCC ($\phi_{p1} = 1,5\text{ cca}$) × PCD (limite médio)				
R^2				
0,96	0,93	0,99	0,74	0,91
PCC ($\phi_{p1} = 1,5\text{ cca}$) × PCD (limite inferior)				
R^2				
0,98	0,82	0,97	0,75	0,85

Observa-se que, por essa abordagem, o tamanho da amostra não influenciou os resultados de K_{sat} , considerando que os ensaios realizados nas amostras com 250 cm^3 (Tabela 9) apresentaram a mesma tendência daqueles realizados nas amostras com 100 cm^3 (Tabela 8).

Outro índice estatístico adotado nesta pesquisa, para avaliar o desempenho do permeâmetro proposto na estimativa da K_{sat} em comparação com o do Guelph, foi o coeficiente de variação (CV). Sob este ponto de vista, foram considerados todas as variáveis envolvidas nos ensaios: tamanho da amostra; tipo de permeâmetro; cargas hidráulicas constante; cargas hidráulicas decrescente; tipos de solos; cujos resultados podem ser observados na Tabela (10).

Tabela 10. Coeficientes de variação (CV) para os resultados de K_{sat} dos solos via permeâmetro proposto, anéis de 100 cm³ e de 250 cm³, utilizando o PCC sob cargas hidráulicas $\phi_{p1} = 1,5$ cca e $\phi_{p2} = 2,5$ cca, e PCD, aplicando variação da carga hidráulica sob os limites superior, médio e inferior

Tipo de Permeâmetro	Tamanho da Amostra	Carga Hidráulica	Perfil 1		Perfil 2	Perfil 3		
			Ap	Bt ₁	Ap	Ap	Bt ₁	
	cm ³	cca	CV (%)					
PCC	100	$\phi_{p1} = 1,5$	61,19	123,34	59,80	109,69	87,60	
		$\phi_{p2} = 2,5$	61,67	102,62	57,31	92,30	79,19	
	250	$\phi_{p1} = 1,5$	113,51	103,10	144,47	68,54	142,46	
		$\phi_{p2} = 2,5$	96,22	87,64	110,73	65,41	107,14	
PCD	100	LS	156,03	85,40	193,20	70,86	135,29	
		LM	137,46	82,83	133,73	103,39	94,97	
		LI	142,85	94,52	120,77	158,07	88,64	
	250	LS	119,11	113,68	107,05	19,89	32,77	
		LM	122,90	118,17	111,56	23,54	31,44	
		LI	122,54	109,48	111,20	46,36	26,69	

LS: Limite Superior, onde $h_1 = 67,6$ cca e $h_2 = 57,6$ cca; LM: Limite Médio, onde $h_1 = 49,3$ cca e $h_2 = 39,3$ cca; LI: Limite Inferior, onde $h_1 = 31,3$ cca e $h_2 = 21,3$ cca.

Os valores de CV para a K_{sat} apresentaram variabilidade classificada como média ($12\% < CV < 60\%$) a alta (> 60), conforme sugerido em Warrick e Nielsen (1980). Os maiores valores, em geral, foram observados para os ensaios de K_{sat} realizados nas amostras do Perfil 1, horizonte Ap, via PCD, independentemente do tamanho da amostra e da carga aplicada decrescentemente, variando entre 119 e 156 %.

Esses altos valores de CV para a condutividade hidráulica de solos tem sido amplamente divulgado na literatura, onde se atribui a alta variabilidade espacial deste atributo físico-hídrico aos muitos fatores que influenciam seus resultados, como por exemplo, a umidade atual do solo durante os ensaios *in situ* (GUNARATNAM et al., 2020). Assim, Souza e Alves (2003) imputaram os elevados valores de coeficientes de variação de K_{sat} ao efeito local, devido à alta variabilidade espacial dos solos, comum às propriedades de movimento tridimensional da água. Genro Junior (2002) e Abreu, Reichert e Reinert (2004), constataram um coeficiente de variação de 104% e 53% para a K_{sat} obtida em campo. Segundo Elrick e Reynolds (1992), o coeficiente de variação pode chegar a 300 % em solos argilosos. Um coeficiente de variação entre 112 e 248 % foi observado por Lima et al. (2006). Queiroz (1995) verificou coeficiente de variação para K_{sat} de 100 a 200%; Azevedo (2004), em solo sob pastagem, encontrou 226 %.

Em geral, o melhor desempenho do permeâmetro proposto foi observado para os ensaios com as amostras do Perfil 3, horizonte Ap, principalmente no PCC e no PCD, anéis de 250 cm³, independentemente da carga hidráulica aplicada. Neste caso, os menores valores foram observados para o PCD, variando de 19,89; 23,54 e 46,36 %, para as respectivas cargas sob limite superior (LS), médio (LM) e inferior (LI). Já para o PCC os valores foram 68,54 % e 65,41 %, para as cargas $\phi_{p1} = 1,5$ cca e $\phi_{p1} = 2,5$ cca, respectivamente (Tabela 10).

Estes menores valores de CV, especificamente para os ensaios com o Perfil 3, Ap, utilizando cargas decrescentes, parecem apontar que o permeâmetro proposto apresenta uma dependência em relação ao tamanho da amostra, indicando melhor desempenho quando os ensaios foram realizados na amostra com 250 cm³. De acordo com Almeida et al. (2017), analisando o efeito de diferentes tamanhos de anéis ($\cong 98$ cm³; $\cong 312$ cm³) nos resultados de K_{sat} , com PCC e PCD, verificaram que os resultados para os ensaios com PCC, anel maior, apresentaram menor coeficiente de variação, indicando uma melhor representatividade das amostras.

Neste nível de escala, com tamanhos de amostras para os ensaios de K_{sat} em laboratório, variando, aproximadamente, entre 100 e 300 cm³, pode-se inferir que há dependência dos resultados em função do tamanho da amostra na comparação com os dados de campo. De fato, outras pesquisas, com faixa de tamanho mais abrangente, já comprovaram esta tendência (BENSON; HARDIANTO, 1998). Neste sentido, Agung, Damianto e Pramusandi. (2013), realizando ensaios de K_{sat} com PCD, comentam que as amostras com menor diâmetro ($\leq 3'' \cong \leq 7,62$ cm \times 1 cm de altura, volume $\cong 46$ cm³) podem não representar a condição de campo em relação às amostras com maior diâmetro (10'' $\cong 25,4$ cm \times 8 cm de altura volume $\cong 4000$ cm³), onde o aumento no tamanho da amostra promove alterações significativas nos valores de K_{sat} . Por outro lado, há trabalhos que comprovam a grande variabilidade da K_{sat} em função do tamanho do corpo de prova em escala de campo. Assim, Lanoix, Pabst e Aubertin (2020), avaliando a determinação da condutividade hidráulica *in situ* em solo arenoso, por meio do uso de infiltrômetro de anel simples, infiltrômetro de anel duplo e permeâmetro de Guelph, comentam sobre o efeito do tamanho dos anéis, quando realizados os ensaios pelo método do anel simples (AS). Os autores comprovaram que, quando foi usado o AS, com diâmetro maior (30 cm), geralmente os valores de K_{sat} eram mais baixos do que os ensaios anéis menores (15 cm). Essa diferença observada entre os raios de ação dos anéis tende a confirmar que os ensaios com um raio de infiltrômetro maior foram menos influenciados pelas condições de contorno e fluxo lateral de água e, portanto, foram considerados mais representativos da infiltração vertical.

Desse modo, a grande variabilidade dos valores de K_{sat} não são apenas observada para os dados gerados em laboratório, mas também, e principalmente, nos ensaios de campo (FIORI; CAMPOS; ALMEIDA, 2010), como os aqui apresentados na Tabela 11, onde se verifica que os valores de coeficiente de variação variaram em uma faixa com valores extremos maiores (41,91 a 179,85 %) do que aquela constatada para os ensaios em laboratório (19,89 a 158,07 %).

Quanto a essa alta dispersão dos resultados de K_{sat} , obtidos para os ensaios de campo, ela pode ser atribuída à variação de espaço poroso em função das variações estruturais do solo (PILATTI et al., 2018), promovidas pelo manejo ou condições intrínsecas do solo. Este argumento é válido para os dados da Tabela 11, pois seus valores foram obtidos a partir dos dados de K_{sat} determinados em campo pelo Guelph, mas, neste caso, calculados, separadamente, para todos os fatores de forma α , sugeridos por Elrick, Reynolds e Tan (1989), conforme vistos Tabela 2.

Tabela 11. Coeficientes de variação (CV) para os resultados de K_{sat} dos solos via permeâmetro de Guelph, utilizando-se a metodologia de um estágio, para todos os fatores de forma α sugeridos por Elrick, Reynolds e Tan (1989), em função da macroporosidade e textura do solo

Perfil 1		Perfil 2	Perfil 3	
Ap	Bt ₁	Ap	Ap	Bt ₁
CV* (%)				
50,34	41,91	83,37	115,08	179,85

*Coeficiente de variação para os valores dos fatores de forma α (cm^{-1}) iguais a 0,01; 0,04; 0,12; 0,36; referenciados como fator 1, 2, 3, 4, respectivamente.

Essa forma de calcular os resultados de K_{sat} via Guelph (considerando os valores de α , do fator 1 ao 4, Tabela 2) contempla todas as possíveis possibilidades de variações que podem ocorrer em campo em função dos fatores que influenciam a dinâmica da água no solo, como macroporosidade (fissuras, formigueiros, furos de raízes, etc.) e textura do solo. Assim, os resultados da Tabela 11 reforçam a alta variabilidade da K_{sat} em campo, como observada em Mesquita (2001), mas também comprovam que, utilizando-se esta forma de cálculo, os valores de CV tornam-se discrepantes, e sem um padrão definido, para explicar o comportamento da dinâmica hídrica dos solos estudados. Isto indica que, nos cálculos da K_{sat} via Guelph, é necessário a escolha de um valor α que seja mais coerente com as reais condições do solo durante os ensaios de campo, sendo nesta pesquisa selecionado o fator 2 ($\alpha = 0,04 \text{ cm}^{-1}$, Tabela 2).

Portanto, os valores de CV da Tabela 11 não mostram coerência com os valores de CV para os ensaios de laboratório, em relação às maiores e menores variabilidades dos dados. Entretanto, se considerarmos que as discussões anteriores foram baseadas nos valores de K_{sat} via Guelph, calculados considerando apenas o valor de $\alpha = 0,04 \text{ cm}^{-1}$, pode-se constatar uma maior concordância entre os CV's obtidos para as duas condições do estudo (campo e laboratório), como discutido anteriormente.

Apesar dos métodos de campo serem mais recomendados para determinação da K_{sat} , por abrangerem um volume maior de solo, sendo possível avaliar os efeitos da variabilidade natural, descontinuidades do solo, além de não exigir a retirada de amostras deformadas ou indeformadas do solo (FIORI; CAMPOS; ALMEIDA, 2010), estes, para gerarem dados significativos, exigem um maior número de ensaios (SANTOS, 2011), que podem onerar a obtenção dos resultados *in situ*, em termos de duração e custo de todo o processo (STRAYER et al., 2003; BLACK, 2010).

Por outro lado, os ensaios realizados em laboratório também têm suas dificuldades e incertezas, como aquelas relativas ao fator escala, já que o fluxo é avaliado em volumes menores de solo (anéis de 100 e de 250 cm^3 , por exemplo); podendo ainda apresentar problemas com a obtenção de números de amostra que sejam representativos para estimar a K_{sat} (GOOTMAN; KELLNER; HUBBART et al., 2020). Além disso, como já mencionadas, existem dificuldades na manutenção da estrutura da amostra durante os ensaios, escolha de métodos (PCC, PCD), bem como os custos para aquisição de permeâmetros comerciais automatizados (BENSON; HARDIANTO; MOTAN, 1994).

Com essas considerações, o permeâmetro proposto, aqui apresentado e validado com os ensaios de campo (Guelph), apresentou vantagens, como: a redução dos problemas relativos a perturbação da estrutura das amostras, principalmente no caso de solos arenosos; além dos baixos custos para sua confecção, pois foram utilizados materiais mais acessíveis, com poucas horas de mão-de-obra para sua fabricação. Diante desses fatos, e por não existir no mercado um equipamento similar, foi realizado o depósito de pedido de patente, junto ao Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), por meio do Núcleo de Inovação Tecnológica (NIT) da UFRPE. O equipamento está registrado como Patente de Invenção, com o título “Permeâmetro contínuo de carga constante e decrescente para determinação de condutividade hidráulica em meios porosos” (ALMEIDA; ALMEIDA, 2020).

5. CONCLUSÕES

Com os resultados gerados pelos ensaios de determinação da K_{sat} pelos permeâmetros de campo e de laboratório, foi possível concluir que:

- O equipamento desenvolvido tem baixo custo de fabricação, além do adicional tecnológico de permitir a saturação do corpo de prova no próprio equipamento, realizando ensaios para determinação da K_{sat} pelos métodos de carga constante e decrescente, mantendo a amostra fixa ao mesmo, sem perturbação da sua estrutura;
- Os resultados da K_{sat} obtidos pelo permeâmetro proposto foram similares aos gerados pelo permeâmetro de Guelph comercial, dentro de uma faixa satisfatória ($R^2 > 0,70$), com aproximadamente o mesmo nível de exatidão e precisão;
- A carga hidráulica aplicada ao solo durante os ensaios de laboratório, pelo método da carga constante, não influenciou os valores da K_{sat} obtidos pelo permeâmetro proposto, podendo-se usar valores entre 1,5 cca e 2,5 cca;
- O tamanho da amostra influenciou os resultados da K_{sat} obtidos pelo permeâmetro proposto, sendo maiores nas amostras consideradas padrão (100 cm^3) em relação às coletadas nos anéis com 250 cm^3 ;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 519-531, 2004.
<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000300013>

AGUNG, M. A. P.; DAMIANTO, B.; PRAMUSANDI, S. Hydraulic Conductivity Measurement of Compacted Clay Soil Liners for Waste Containment Structures. **Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering**, v. 3, n. 4, p. 125-145, 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/320921097_Hydraulic_Conductivity_Measurement_of_Compacted_Clay_Soil_Liners_for_Waste_Containment_Structures>. Acesso em 25 junho 2018.

ALMEIDA, B. G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**. 2008. 105 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - ESALQ/USP, São Paulo, 2008. [10.11606/T.11.2008.tde-18112008-100808](https://repositorio.usp.br/handle/11362/44112008-100808)

ALMEIDA, B. G.; ALMEIDA, C. D. G. C.; Permeâmetro contínuo de carga constante e decrescente para determinação de condutividade hidráulica em meios porosos. BR1020200132024, Jun 26, 2020.

ALMEIDA, K. S. S. A.; SOUZA L. S.; PAZ, V. P. S.; SILVA, F. T. S.; SANTOS, D. N.; PEREIRA, J. S. L. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado em latossolo amarelo distrocoeso, no município de Cruz das Almas. **Irriga**, Botucatu, v. 22, n. 2, 15 fev. 2017. Trimestral. Disponível em: <<http://irriga.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/2328>>. Acesso em 25 janeiro 2020.

ALVARENGA, C. C.; MELLO, C. R.; MELLO, J. M.; VIOLA, M. R. Continuidade espacial da condutividade hidráulica saturada do solo na bacia hidrográfica do alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2011. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180221126029>>. Acesso em 25 junho 2018. ISSN 0100-0683.

AMARO FILHO, J. ASSIS JUNIOR, R. N. MOTA, J. C. A. **Física do solo: conceitos e aplicações**. 1º. ed. Fortaleza, CE, 2008.

AZEVEDO, E. C. **Uso da geoestatística e de recursos de geoprocessamento no diagnóstico da degradação de um solo argiloso sob pastagem no Estado de Mato Grosso**. 2004. 158 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.
<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/257580>

BAGARELLO, V., IOVINO, M. Conducibilità idraulica del suolo – Metodi di misura nelle applicazioni idrologiche. **Ulrico Hoepli Editore S.p.A.**, 2010, 382 pp., ISBN 978-88-203-4411-5.

BAGARELLO, V.; PROVENZANO, G. Factors affecting field and laboratory measurement of saturated hydraulic conductivity. **Transactions of the ASAE**, v.39, n.1, p.153-159, 1996.

BENSON, C. H.; HARDIANTO, F. S.; MOTAN, E. S. Representative specimen size for hydraulic conductivity assessment of compacted soil liners. In: *Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil*. ed. **D. DANIEL and S. TRAUTWEIN** (West Conshohocken, PA: ASTM International), p. 3-29, 1994. <https://doi.org/10.1520/STP23883S>

BENSON, C., H.; HARDIANTO, F. S. Representative sample size for hydraulic conductivity measurement of compacted soil liners for waste containment structures. Proceeding: **Geoteknik di Indonesia Menjelang Milenium ke, VII – 33 – VII – 52**, 3 p., 1998.

Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/320921097_Hydraulic_Conductivity_Measurement_of_Compacted_Clay_Soil_Liners_for_Waste_Containment_Structures>. Acesso em 25 de junho 2020.

BLACK, J.H. The practical reasons why slug tests (including falling and rising head tests) often yield the wrong value of hydraulic conductivity. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, 43, 345-358, 2010.
10.1144/1470-9236/08-094

LANOIX, M.L.; PABST, T.; AUBERTIN, M. Field determination of the hydraulic conductivity of a compacted sand layer controlling water flow on an experimental mine waste rock pile. **Hydrogeology Journal**, v. 28, p.1503–1515, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02129-7>

DEC, D.; DÖRNER, J.; BECKER-FAZEKAS, O.; HORN, R. Effect of bulk density on hydraulic properties of homogenized and structured soils. **Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal**, v. 8(1), p. 1-13, 2008.
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912008000100001>.

ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D. Methods for analyzing constant-head well permeameter data. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 1, p. 320-323, janeiro, 1992. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912008000100001>.

ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D.; TAN, K. A. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analysis. **Groundwater Monitoring Review**, v.9. p.184-193,1989. 10.1111/j.1745-6592.1989.tb01162.x

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2 ed. Brasília-DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2012.

FIORI, J. P. O.; CAMPOS, J. E. G.; ALMEIDA L. Variabilidade da condutividade hidráulica das principais classes de solos do estado de Goiás. **Geociências**, v. 29, n. 2, p. 229-235, 2010.

FLINT, A. L.; FLINT, L. E. Particle density. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. *Methods of soil analysis: Physical methods*. **Soil Science Society of America**, Madison, 2002. Part 4. p. 229-241.

GEE, G.W.; OR, D. Particle size analysis. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. Methods of soil analysis. Physical methods. **Soil Science Society of America**, Madison, 2002. Part 4. p. 255-293.

GENRO JUNIOR, S. A. **Alteração da compactação do solo com o uso de rotação de culturas no sistema plantio direto**. 2002. 90 p. Dissertação - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

GHIBERTO, P. J.; MORAES, S. O. Comparação de métodos de determinação da condutividade hidráulica em um latossolo vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** vol. 35, n.4, p. 1177-1188, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000400011>. ISSN 0100-0683

GIANELLO, E. M.; BUENO, C. R. P. Variabilidade espacial de atributos e perda de solo na definição de zonas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. Goiânia, v. 45, n. 1, p. 18-28, janeiro/março, 2015. <https://doi.org/10.1590/1983-40632015v4528029>

GONÇALVES, M. A.; DICESAR, A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2013. 10.1590/S0100-06832013000500007. ISSN 0100-0683

GOOTMAN, K.S.; KELLNER, E.; HUBBART, J. A. A comparison and validation of saturated hydraulic conductivity models. **Water**, 12, p. 20-40, 2020. DOI:10.3390/w12072040

GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. The solid phase. In DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Eds.), SSSA Book Series: 5. Methods of Soil Analysis Part 4-Physical Methods . **Soil Science Society of America Inc.** Madison, WI, pp. 201–415, 2002.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; GELAIN, N. S.; MINELLA, J. P. G. Permeâmetro de carga decrescente associado a programa computacional para a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300041>

GUEDES, L. P. C.; URIBE-OPAZO, M. A.; JOHANN, J. A.; SOUZA, E. G. Anisotropia no estudo da variabilidade espacial de algumas variáveis químicas do solo **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p. 2217-2226, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v32n6/v32n6a01.pdf>>. Acesso em 25 junho 2018.

GUNARATNAM, A.; GRAFTON, M.; JEYAKUMAR, P.; BISHOP, P.; DAVIES, C. E.; McCURDY, M. Study the influence of soil moisture and packing incremental level on soil physical and hydraulic properties. In: *Nutrient Management in Farmed Landscapes*. (Eds. C.L. Christensen, D.J. Horne and R. Singh). <http://flrc.massey.ac.nz/publications.html>. Occasional Report No. 33. Farmed Landscapes Research Centre, Massey University, Palmerston North, New Zealand. 6 p, 2020.

JONG van LIER, Q.; LIBARDI, P. L. Variabilidade dos parâmetros da equação que relaciona a condutividade hidráulica com a umidade do solo no método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 1999. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180218348029>>. Acesso em 25 junho 2018. ISSN 0100-0683

KHAN, I.; NAKAI, K.; NODA, T. Experimental research on development/diminishing of anisotropy and its effect on mechanical behavior of clay. *International Journal of Geotechnique, Construction Materials and Environment*, v.18, Issue 65, p. 9 – 14, 2020. <https://doi.org/10.21660/2020.65.4729>

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um latossolo vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 26:857-867, 2002. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v26n4/03.pdf>>. Acesso em 01 agosto 2018.

LIMA, C. L. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; GUBIANI, P. I.; Qualidade físico-hídrica e rendimento de soja (*Plycine max L.*) e feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) de um argissolo vermelho distrófico sob diferentes sistemas de manejo. *Santa Maria: Ciência Rural*, v. 36, n. 4, ago. 2006. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/cr/v36n4/a20v36n4.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2020.

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 topossequência com diferentes coberturas vegetais no baixo amazonas. *Ecta Amazonica*, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/aa/v38n2/v38n2a02.pdf>>. Acesso em 25 junho 2018.

MARQUES, J.D.; LIBARDI, P.L.; JONG van LIER, Q. Relação entre horizontes pedológicos e propriedades hidráulicas em dois Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 26:567- 577, 2002.

MESQUITA, M. G. B. F. **Caracterização estatística da condutividade hidráulica saturada do solo**. 2001. 110 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

MESQUITA, M. G. B.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Revista Ciência Rural**, v.34, n.3, 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cr/v34n3/a52v34n3.pdf>>. Acesso em 25 junho 2018.

MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O.; PERUCHI, F.; TEREZA, M.C. Alternativa para caracterização da condutividade hidráulica saturada do solo utilizando probabilidade de ocorrência. *Ciência e Agrotecnologia*, 31:1605-1609, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542007000600001>.

MILLAR, A.A. **Drenagem de terras agrícolas: bases agrônômicas**. São Paulo: Mc Graw-Hill do Brasil, 1978, 276p.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 10:30-37, 2006.
<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662006000100005>.

NAVEED, M.; MOLDRUP, P.; ARTHUR, E.; WILDENSCHILD, D.; EDEN, M.; LAMANDÉ, M.; VOGEL, H.; DE JONGE, L. Revealing soil structure and functional macroporosity along a clay gradient using xray computed tomography. *Soil Science Society of America Journal* v. 77, p. 403-411, 2013. 10.2136/sssaj2012.0134

PILATTI, M. A.; SECCO, D.; ZANÃO Jr., L. A.; MARINS, A. C. DE; TOKURA L. K.; VILLA, B. DE. Structural alterations of Paraná's oxisols by cover crops. **Journal of Agricultural Science**, 10, 180-190, 2018. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n9p180>

PINHEIRO, R. J. B.; NUMMMER, A. V.; RAUBER, A. C. Determinação da condutividade hidráulica das principais unidades geológico-geotécnicas de Santa Maria – RS. **Geociências**, São Paulo, v. 36, n. 2, p. 347-363, 2017.

QUEIROZ, J. E. **Parâmetros hidrodinâmicos de um solo de várzea para fins de drenagem subterrânea**. 1995. 167 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1995.

RAMOS, M. R.; FAVARETTO, N.; UHLMANN, A.; DIECKOW, J.; VEZZANI, F.; ALMEIDA, L. Produção de hortaliças no sistema orgânico: efeito nos atributos físicos do solo. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 58, n. 1, p. 45-51, jan./mar. 2015.
<http://doi.editoracubo.com.br/10.4322/rca.1666>

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188p. Embrapa Semiárido (CPATSA)

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. In situ measurement of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the α -parameter using the Guelph permeameter. **Soil Science**, v.140, n. 4, p. 292–302, 1985.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. A method for simultaneous in situ measurement in the vadose zone of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity pressure head relationship. **Ground Water Monitoring Review**, v.6, p.84-95, 1986.

RODRIGUEZ, T. T.; WEISS, L. A.; TEIXEIRA, R. S.; BRANCO, C. J. M. C. Permeabilidade de solo laterítico por diferentes métodos. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**: Londrina, v. 36, n. 2, p. 17-32, dez, 2015. Disponível em:<<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semexatas/article/view/13577/17141>>. Acesso em 25 junho 2018.

ROWSHANZAMIR, M. A.; ASKARI, A. M. An investigation on the strength anisotropy of compacted clays, **Applied Clay Science**, v. 50, n. 4, p. 520-524, 2010.

SILVA, C.L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 32. p. 213-220, 1997. Disponível em: <<https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/download/4628/7122>>. Acesso em 25 junho 2018.

SILVA, E.B. & LIBARDI, P.L. Propriedades hidráulicas de um solo não saturado utilizando-se o permeâmetro a disco. *Sciência Agrícola*, v.57, p. 525-529, 2000. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/sa/v57n3/2686.pdf>>. Acesso em 25 junho 2020.

SOILMOISTURE Equipment Corp. Model 2800K1. **Guelph Permeameter, Operating Instructions**. 2012. Disponível em: <https://www.soilmoisture.com/pdfs/Resource_Instructions_0898-2800_2800K1%20Guelph%20Permeameter%20.pdf>. Acesso em 25 junho 2018.

SOTO, M.A.; CHANG, K.H.; ORENCIO, M.V. Análise do método do permeâmetro guelph na determinação da condutividade hidráulica saturada. *Águas Subterrâneas*. v.23, n.01, p.137-152, 2009. 10.14295/ras.v.23i1.17004

STEFANOSKI, C. D.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, n.12, p.1301-1309, 2013. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v17n12/v17n12a08>>. Acesso em 01 agosto 2018.

STRAYER, D.L.; BEIGHLEY, R.E.; THOMPSON, L.C.; BROOKS, S.; NILSSON, C.; PINAY, G.; NAIMAN, R.J. Effects of land cover on stream ecosystems: roles of empirical models and scaling issues. *Ecosystems*, 6, p. 407-423, 2003.

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