

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CÂMPUS APUCARANA

FÁBIO REYGE TAKENAGA

**ESTUDO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE UM SOLO RESIDUAL DE
BASALTO COM USO DO PERMEÂMETRO GUELPH**

APUCARANA

2022

FÁBIO REYGE TAKENAGA

**ESTUDO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE UM SOLO RESIDUAL DE
BASALTO COM USO DO PERMEÂMETRO GUELPH**

**Study of hydraulic conductivity of a basalt residual soil using the Guelph
permeometer**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Profa. Dra. Mariana Alher Fernandes.

APUCARANA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

FÁBIO REYGE TAKENAGA

**ESTUDO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE UM SOLO RESIDUAL DE
BASALTO COM USO DO PERMEÂMETRO GUELPH**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Profa. Dra. Mariana Alher Fernandes.

Data de aprovação: 11/Março/2022

Profa. Dra. Mariana Alher Fernandes – ORIENTADORA

Titulação: Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Apucarana

Prof. Msc. Augusto Montor de Freitas Luiz – EXAMINADOR

Titulação: Mestrado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Apucarana

Profa. Dra. Priscila Pini Pereira – EXAMINADORA

Titulação: Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Apucarana

Profa. Dra. Raquel Souza Teixeira – EXAMINADORA

Titulação: Doutorado

Universidade Estadual de Londrina

APUCARANA

2022

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à Deus por guiar meu caminho para esta realização de um sonho.

À minha família por toda educação, amor e suporte que recebo diariamente, meu pai Osvaldo, minha mãe Sandra e minha irmã Karina.

À minha avó Júlia (*in memoriam*) e minha avó Toshi (*in memoriam*), essas duas despedidas durante esse período graduação não foi nada fácil, mas acredito e confio nas escolhas do Senhor, e sei que seja onde estiverem, estarão felizes com essa minha conquista.

À minha querida amiga Marinara, por acreditar e confiar nas minhas escolhas e por estar sempre presente em momentos importantes da minha vida, tornou-se essencial e como parte da minha família.

A todos amigos e colegas que Apucarana proporcionou, e os de Itararé, todos possuem um papel importante na minha vida, com conselhos, companhias, risadas, sermões, ajudas etc. Isabel, Leonardo, Fran, Víctor, Thaiza, Danilo, Eduardo, Tauana, Jean, João e Nilton.

À minha orientadora professora Dra. Mariana, por toda paciência e orientação deste trabalho e pela oportunidade da monitoria da disciplina de Mecânica dos Solos.

À professora Sarah, pela oportunidade da monitoria da disciplina de Materiais de Construção Civil.

A Construtora Regioli, pela oportunidade do estágio, onde pude aprender na prática diversos conceitos vistos na teoria.

A Prefeitura Municipal de Apucarana, por fornecer a autorização para que os ensaios pudessem ser realizados em locais públicos.

RESUMO

A condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade é um parâmetro hidráulico do solo que representa a facilidade ou dificuldade que um fluido percola no solo. Este parâmetro pode ser determinado a partir de métodos *in situ* e laboratorial tanto para a condição saturada quanto para a condição não saturada. O principal objetivo deste trabalho é determinar a condutividade hidráulica saturada de um solo residual de basalto em campo com uso do permeâmetro Guelph a partir dos métodos de uma e duas alturas de carga hidráulica. Os ensaios foram conduzidos em furos de sondagem com 45 cm de profundidade e 6 cm de diâmetro para 6 diferentes localidades e cotas altimétricas localizadas no município de Apucarana, Estado do Paraná. Também foram realizados ensaios de análise granulométrica conjunta assim como ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade com o solo coletado em cada furo de sondagem. Os resultados dos ensaios de permeabilidade mostraram que os valores da condutividade hidráulica saturada de campo encontram-se na ordem de 10^{-5} cm/s, podendo ser associado a solos com grau de permeabilidade muito baixo e correspondendo ao tipo de solo de areias finas siltsas e argilosas assim como siltes argilosos. Já os resultados da condutividade hidráulica não saturada apontaram valores iguais ao da condutividade hidráulica saturada para o método de uma altura de carga enquanto que, para o método de duas alturas de carga, alguns valores tiveram que ser descartados, por serem negativos. Os resultados referentes ao ensaio de sedimentação não foram coerentes com os esperados que, certamente por conta da mistura (solo, água destilada e defloculante) não ter ficado totalmente homogênea, estes foram desconsiderados. Os ensaios de peneiramento fino indicaram que a granulometria das amostras de solo possui, no mínimo, 95% de argila, silte e uma parcela de areia fina, enquanto que os valores de limite de liquidez e limite de plasticidade variaram de 44% a 65% e de 33% a 47%, respectivamente. Os resultados da condutividade hidráulica deste trabalho quando comparados com os valores encontrados na literatura técnico científica da região de Apucarana, possuem uma variação na ordem de 10^{-2} cm/s. Perante aos resultados da condutividade hidráulica, conclui-se que não foi possível fazer uma associação esperada da cota do terreno com os resultados de permeabilidade, possivelmente pelo fato do solo não estar mais na sua condição natural. Ademais, os valores encontrados tanto na análise granulométrica conjunta quanto na permeabilidade são condizentes com valores de pesquisas realizadas em regiões próximas a área de estudo.

Palavras-chave: ensaio de permeabilidade; ensaio de caracterização; condutividade hidráulica saturada; permeâmetro Guelph.

ABSTRACT

The hydraulic conductivity or permeability coefficient is a soil hydraulic parameter that represents the ease or difficulty that a fluid percolates through soil. This parameter can be determined from in situ and laboratory methods for both saturated and unsaturated conditions. The main objective of this work is to determine the saturated hydraulic conductivity of a basalt residual soil in the field using the Guelph permeameter from the methods of one and two hydraulic load heights. The tests were conducted in boreholes 45 cm deep and 6 cm in diameter for 6 different locations and altimetric quotas located in the municipality of Apucarana, Paraná State. The soil collected from each borehole was also tested for particle size, liquidity limit, and plasticity limit. The results of the permeability tests showed that the field saturated hydraulic conductivity values are on the order of 10^{-5} cm/s, which can be associated with soils with a very low degree of permeability and corresponding to the soil type of fine silty and clayey sands as well as clayey silts. The results of the unsaturated hydraulic conductivity showed values equal to the saturated hydraulic conductivity for the method with one loading height, while for the method with two loading heights, some values had to be discarded because they were negative. The results for the sedimentation test were not consistent with those expected, which, certainly because the mixture (soil, distilled water and deflocculant) was not completely homogeneous, were disregarded. The fine sieving tests indicated that the granulometry of the soil samples has at least 95% clay, silt and a portion of fine sand, while the values of liquidity limit and plasticity limit varied from 44% to 65% and 33% to 47%, respectively. The results of the hydraulic conductivity of this work when compared with the values found in the technical scientific literature of the Apucarana region, have a variation on the order of 10^{-2} cm/s. In view of the results of hydraulic conductivity, it was concluded that it was not possible to make an expected association of the ground elevation with the results of permeability, possibly because the soil is no longer in its natural condition. Furthermore, the values found both in the joint granulometric analysis and in the permeability are consistent with values from research conducted in regions close to the study area.

Keywords: Permeability testing; Characterization testing; Saturated hydraulic conductivity; Guelph permeameter.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação da estrutura dos solos.....	19
Figura 2 - Estados de consistência do solo	23
Figura 3 - Principais fatores que influenciam no coeficiente de permeabilidade	26
Figura 4 - Permeâmetro de carga constante	28
Figura 5 - Permeâmetro carga variável.....	29
Figura 6 - Esquema do ensaio de bombeamento	30
Figura 7 - Ensaio de tubo aberto esquematizado	31
Figura 8 - Infiltrômetro duplo anel esquematizado	32
Figura 9 - Permeâmetro Guelph esquematizado	34

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	14
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivos específicos	15
1.3	Estrutura do trabalho	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Formação e características do solo	17
2.1.1	Processo de formação dos solos	18
2.1.2	Classificação pedológica dos solos	19
2.1.3	Caracterização dos solos	20
<u>2.1.3.1</u>	<u>Massa específica dos sólidos</u>	<u>21</u>
<u>2.1.3.2</u>	<u>Análise granulométrica conjunta</u>	<u>22</u>
<u>2.1.3.3</u>	<u>Limites de consistência</u>	<u>23</u>
<u>2.1.3.4</u>	<u>Permeabilidade</u>	<u>24</u>
2.2	Condutividade hidráulica dos solos	25
2.3	Métodos de determinação da condutividade hidráulica	27
2.3.1	Métodos laboratoriais	27
<u>2.3.1.1</u>	<u>Permeômetro de carga constante</u>	<u>27</u>
<u>2.3.1.2</u>	<u>Permeômetro de carga variável</u>	<u>28</u>
2.3.2	Métodos <i>in situ</i>	29
<u>2.3.2.1</u>	<u>Ensaio de bombeamento</u>	<u>30</u>
<u>2.3.2.2</u>	<u>Ensaio de tubo aberto ou de infiltração</u>	<u>31</u>
<u>2.3.2.3</u>	<u>Infiltrômetro do duplo anel</u>	<u>32</u>
<u>2.3.2.4</u>	<u>Permeômetro Guelph</u>	<u>33</u>
2.3.3	Métodos indiretos	36
2.4	Pesquisas na área de permeabilidade em solos da região norte do Paraná	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	Materiais	39
3.2	Metodologia	40
3.2.1	Área de estudo	40
3.3	Ensaio de permeabilidade	44

3.4	Ensaio de caracterização.....	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1	Ensaio de caracterização.....	52
4.2	Ensaio de permeabilidade	58
5	CONCLUSÕES	73
	REFERÊNCIAS.....	75
	ANEXO A -	
	Autorização nº005/2020	81

1 INTRODUÇÃO

O solo é composto basicamente por duas partes, uma parte ocupada pelos sólidos do solo e a outra parte que não é ocupada pelos sólidos, designada de poros do solo (LIBARDI, 2005). Todavia, na Mecânica dos Solos, comumente subdivide-se o solo em três fases: fase sólida que contém matérias orgânicas e inorgânicas, fase líquida composta por solução do solo ou água, e fase gasosa que contém o ar do solo (CAPUTO, 1996).

Investigar e conhecer as propriedades físicas e hidráulicas do solo é de suma importância para diversas áreas de atuação, como por exemplo na agricultura, no estudo de infiltração da água nos aquíferos e essencialmente na Engenharia Civil. Dessa maneira, sabendo o uso apropriado do solo e a dinâmica da água no solo é concebível prever o seu comportamento ou até mesmo solucionar problemas de cunho geotécnico em obras civis (PINHEIRO *et al.*, 2009).

A caracterização do solo pode ser realizada através de vários ensaios considerados simples, os quais são comumente nomeados de análise granulométrica conjunta, compactação, resistência, permeabilidade, massa específica dos sólidos e limites de consistência. O conjunto destes ensaios faz com que seja possível determinar alguns parâmetros que identificam não somente a natureza do solo como também correlacioná-los com as propriedades mecânicas, possibilitando até sua classificação (SANTOS, 2009).

Tratando-se da dinâmica da água no solo, define-se a permeabilidade como a facilidade ou dificuldade que um fluido, normalmente a água, possui de percolar em um meio poroso (AZEVEDO, 2005). A permeabilidade do solo é expressa por um parâmetro denominado como condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade, a qual é representada pela letra k e usualmente determinada a partir da lei experimental de Darcy (DAS; SOBHAN, 2019).

Este parâmetro hidráulico do solo pode ser determinado através de correlações empíricas que envolvem o ensaio de adensamento, a partir de ensaios de laboratório como os ensaios de carga constante ou variável, ou ainda em campo, com ensaios de bombeamento, tubo aberto, permeâmetro Guelph, infiltrômetro duplo anel, (SUPO, 2008; FERNANDES, 2011). Os ensaios laboratoriais apresentam

desvantagem devido à pouca representatividade das amostras coletadas e, por esse motivo, sendo utilizado com mais frequência os ensaios em campo (SANTOS, 2005).

Dentre os equipamentos e métodos de ensaio disponíveis para determinação da condutividade hidráulica em campo, destaca-se o permeâmetro Guelph. Este equipamento é considerado de fácil manuseio, provoca pouco impacto ao solo e apresenta maior exatidão na determinação da condutividade hidráulica saturada para uma faixa de valores de 10^{-2} a 10^{-5} cm/s (RAGAB; COOPER, 1990; SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP., 2012). A realização do ensaio pode ser feita através de técnicas relacionadas à altura de carga hidráulica, sendo elas: uma altura de carga (ELRICK *et al.*, 1989), duas alturas de carga (REYNOLDS; ELRICK, 1985), duas alturas de carga com escala heterogênea (ELRICK *et al.*, 1989) e método de Philip (PHILIP, 1985).

A presente pesquisa apresenta o emprego do permeâmetro Guelph para a determinação da condutividade hidráulica saturada e não saturada em diferentes localidades do município de Apucarana, Estado do Paraná. Além disso, também avalia a ocorrência de possíveis alterações na textura e consistência do solo a partir de ensaios laboratoriais assim como analisa os resultados da condutividade hidráulica com valores presentes na literatura técnico-científica da região.

1.1 Justificativa

Na condição genética, os solos podem ser classificados em dois grandes grupos, que dependem ou não de um agente de transporte na sua formação, denominados de solos sedimentares e solos residuais, respectivamente (MACHADO; MACHADO, 1997).

Reconhece-se que os solos residuais são capazes de apresentar características geotécnicas completamente diferentes das encontradas nos solos transportados. Nesse aspecto, a permeabilidade de um solo sedimentar pode geralmente estar relacionada com sua granulometria (MENDES, 2008). Sabe-se que a granulometria assim como a estrutura do solo influencia diretamente na porosidade do solo, resultando em uma maior ou menor facilidade da percolação da água no seu interior (MESQUITA, 2001).

Algumas vezes a percolação da água é considerada prejudicial pois afeta obras de engenharia e ocasiona algumas problemáticas para o meio físico, como por exemplo, erosão interna em taludes e instabilidade em escavações (ANTUNES, 2015).

Segundo Calheiros *et al.* (2009, p.665):

A má determinação da velocidade de infiltração de água no solo poderá acarretar em falhas e prejuízos de sistemas que utilizam o manejo do solo, inclusive impactando o mesmo em aspectos ambientais, como por exemplo, erosão do solo, lixiviação de nutrientes e salinização, dentre outros. (CALHEIROS *et al.*, 2009, p. 665).

O conhecimento da permeabilidade do solo tornou-se adequado e necessário principalmente para projetos e estudos de aterros sanitários, armazenagem de lixos tóxicos, canais, estudo dos solos, reservatórios, sistemas de drenagem, sistemas de irrigação e sistemas de reservatórios sépticos (LISBOA, 2006).

Portanto, visando contribuir com o levantamento de propriedades hidráulicas de solos típicos da Região Norte Central Paranaense, especificamente para o município de Apucarana, faz-se necessário realizar o estudo aprofundado dos solos para analisar e verificar a ocorrência da sua variabilidade espacial.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral determinar a condutividade hidráulica não saturada e saturada do solo *in situ* com uso do permeâmetro Guelph para diferentes locais do município de Apucarana, Estado do Paraná.

1.2.2 Objetivos específicos

Diante do objetivo principal desse trabalho foram estabelecidos cinco objetivos específicos, sendo eles:

- Definir os locais para realização dos ensaios de permeabilidade (área de estudo) em função da cota do terreno e da possível presença de solo natural;
- Caracterizar as amostras de solo coletadas do furo de sondagem escavado para o ensaio de permeabilidade;
- Determinar em campo a condutividade hidráulica saturada do solo com uso do permeâmetro Guelph;
- Estimar a condutividade hidráulica do solo não saturado;
- Analisar a variabilidade espacial dos resultados da condutividade hidráulica a partir da correlação das características do solo com os valores encontrados de condutividade hidráulica saturada e não saturada.

1.3 Estrutura do trabalho

O conteúdo deste trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos, como destacado a seguir:

No Capítulo 1 é apresentada introdução, justificativa assim como objetivo geral e objetivos específicos do presente trabalho.

No Capítulo 2 encontra-se discorrido o texto da revisão bibliográfica referente à literatura consultada do tema do trabalho, estando subdividido em formação e características do solo; condutividade hidráulica dos solos; métodos de determinação da condutividade hidráulica e pesquisas na área de permeabilidade em solos da Região Norte do Paraná.

No Capítulo 3 contém a descrição experimental do estudo, em que estão descrito sobre itens como área de estudo, ensaios de caracterização do solo assim como ensaio de permeabilidade *in situ*.

No Capítulo 4 são indicados os resultados e as discussões referentes aos ensaios de permeabilidade e caracterização do solo conduzidos no decorrer da pesquisa.

No Capítulo 5 são abordadas as conclusões desta pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão bibliográfica reúne conceitos e informações pesquisadas na literatura técnico-científica sobre o tema relacionado com propriedades do solo, condutividade hidráulica e pesquisas acadêmicas inseridas no mesmo contexto do presente projeto de pesquisa.

2.1 Formação e características do solo

Pode-se dizer que “os solos se originam da decomposição de rochas ao longo do tempo que inicialmente constituíam a crosta terrestre” (GON, 2011, p. 5). O processo de formação do solo ocorre através de agentes físicos e químicos, resultando em um corpo natural tridimensional que compõe a camada externa da litosfera e possuindo características e propriedades próprias (ZIMBACK, 2003).

A partir de estudos realizados na Rússia, o cientista Dokuchaev (1846-1903) viabilizou um modelo fatorial da formação do solo, constatando que o mesmo é composto por uma sequência vertical de camadas horizontais decorrente da ação conjunta de vários fatores (PEREIRA *et al.*, 2019). Sucedendo até as teorias existentes, Jenny (1941) possibilitou o melhor entendimento da influência de cada fator para a formação do solo, concebendo a Equação (1) mostrada abaixo:

$$S = f (cl, o, r, p, t) \quad (1)$$

em que: S representa solo, f é a função, cl é o clima, o são os organismos, r é o relevo, p é o material parental, t é o tempo.

Portanto, entende-se que cada solo possui sua particularidade e a fim de se ter um melhor reconhecimento dele, é necessário conhecer seu processo de formação, tipos/classificação de solos e ensaios de caracterização empregados para determinação de suas propriedades físicas, químicas, mecânicas e hidráulicas.

2.1.1 Processo de formação dos solos

De acordo com a NBR 6502:1995 – Rochas e solos (ABNT, 1995), o termo solo pode ser definido como todo material proveniente da decomposição ou desagregação das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não conter matéria orgânica, sucedendo-se pela pedogênese. A ação do intemperismo físico e/ou químico, o qual também pode ser denominado como meteorização, é o processo geológico no qual a rocha se fragmenta e colapsa decorrente de um conjunto de alterações físicas e/ou químicas que as rochas sofrem ao emergirem na superfície terrestre.

Segundo Mugler *et al.* (2005), a pedogênese pode ser definida como o processo no qual o solo se forma, levando em consideração o resultado dos fatores de formação do solo que nele atuam como material de origem, ação climática, relevo, organismos e o tempo. Todas as rochas, mesmo aquelas que parecem indestrutíveis, podem se enfraquecer e desagregar em contato com a água e os gases da atmosfera (GROTZINGER; TOM, 2014).

Do ponto de vista do processo de formação dos solos quanto à sua origem, estes podem ser classificados em solos residuais, solos transportados e solos orgânicos. Os solos residuais são aqueles que se originaram e permaneceram no mesmo local de origem, que diferentemente dos solos transportados, que são aqueles em que algum momento foram erodidos, transportados e depositados em um local diferente da sua origem (KNAPPETT; CRAIG, 2018). Já os solos orgânicos, são aqueles que possuem quantidade considerável de matéria orgânica vegetal e animal na sua composição, geralmente apresentando coloração cinza a preta e um odor característico.

Ainda, de acordo com a pedologia, o solo pode ser considerado como um sistema constituído por três fases representado pela fase sólida (grãos e partículas minerais), fase líquida (normalmente representado pela água) e fase gasosa (usualmente ar), como mostra a representação da estrutura do solo na Figura 1 “Essa divisão em três fases facilita a caracterização mecânica do solo como um material, e a partir daí consegue-se caracterizar e constituir padrões interpretativos” (FLORIANO, 2016, p. 16-17).

Figura 1 – Representação da estrutura dos solos

Fonte: Baseado em Libardi (2005)

2.1.2 Classificação pedológica dos solos

De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2011), “o Brasil possui uma grande diversidade de solos em sua extensão continental, decorrente da ampla diversidade de pedoambientes e de fatores de formação do solo”, apresentando em cerca de 70% do território brasileiro predominância de Latossolos, Argissolos e Neossolos.

Segundo o Sistema de Classificação Brasileiro de Solos (SiBCS), os solos podem ser classificados a partir de uma avaliação conjunta dos dados físicos, mineralógicos, morfológicos e químicos do perfil representado, além disso, também são considerados alguns aspectos ambientais do local do perfil, tais como, clima, relevo, vegetação, condições hídricas e material originário (EMBRAPA, 2020). Desta maneira, tem-se basicamente 13 classes de solos no Brasil, estando estes representados no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação dos solos – Sistema de Classificação Brasileiro de Solos (SiBCS)
(continua)

Classe	Característica do solo
Argissolos	Solos com acúmulo de argila em subsuperfície
Cambissolos	Solos moderadamente desenvolvidos
Chernossolos	Solos com cor escura na superfície e alta saturação por bases
Espodossolos	Solos com acúmulo de matéria orgânica e/ou alumínio e ferro em subsuperfície
Gleissolos	Solos com cores acinzentadas
Latossolos	Solos altamente desenvolvidos

Quadro 1 – Classificação dos solos – Sistema de Classificação Brasileiro de Solos (SiBCS) (conclusão)

Classe	Característica do solo
Luvissolos	Solos com acúmulo de argila em subsuperfície associado à argila de atividade alta
Neossolos	Solos pouco desenvolvidos
Nitossolos	Solos argilosos, ausência de gradiente textural e bem estruturados
Organossolos	Solos de constituição orgânica
Planossolos	Solos com abrupto acúmulo de argila em subsuperfície e baixa permeabilidade
Plintossolos	Solos com expressivo acúmulo e segregação de ferro
Vertissolos	Solos expansivos e com alta saturação por bases

Fonte: Baseado em EMBRAPA (2020)

O Estado do Paraná apresenta em 52,98% do seu espaço territorial presença de Latossolos e Neossolos (BHERING; SANTOS, 2008). Em sua obra, o escritor Pellegrini (1990, p.15-16) transmite a ideia da formação do solo da região norte do estado, mencionado que:

No norte do Paraná, por capricho a lava endureceu sobre um imenso lago subterrâneo, o Aquífero Botucatu. Mas sua massa mineral era do mesmo basalto derramado também na África e em vários outros pontos do Brasil. Mas só no Norte do Paraná, o Basalto viraria a famosa 'terra roxa', apelido devido aos colonos italianos que chamavam de rosa a terra vermelha (...). A extraordinária qualidade da terra roxa para a agricultura vem, antes de tudo, das chuvas, da umidade no ar e no solo (...). O basalto, rocha-mãe da terra, conforme se corrompia pela umidade durante milênios, foi liberando óxido de ferro que deu a cor avermelhada (PELLEGRINI, 1990, p. 15-16).

2.1.3 Caracterização dos solos

O solo pode ser caracterizado a partir de ensaios laboratoriais e de campo, seguindo normas técnicas nacionais ou internacionais para realização de tal procedimento. Esses ensaios são utilizados para determinação das suas propriedades físicas, químicas, hidráulicas ou até mesmo mecânicas. Dentre os ensaios relativos às propriedades físicas dos solos estão a massa específica dos sólidos, análise granulométrica conjunta (sedimentação e peneiramento) e limites de consistência (limite de liquidez, limite de plasticidade e limite de contração).

Já dentre os ensaios para determinação das propriedades químicas tem-se, por exemplo, pH, capacidade de troca iônica, condutividade elétrica, teor de matéria orgânica e teor de nutrientes enquanto que os ensaios para cálculo das propriedades hidráulicas correspondem aos ensaios de permeabilidade em campo e laboratório a partir do emprego de diversas técnicas com a finalidade de estimar a condutividade hidráulica desse material.

Por último, tem-se os ensaios para cálculo das propriedades mecânicas do solo como, por exemplo, ensaio de compressão triaxial, ensaio de cisalhamento direto, ensaio da palheta (*Vane Test*), *Ring Shear Test*.

Portanto, nos próximos sub-itens dessa revisão bibliográfica estarão apresentados um breve resumo de ensaios voltados para caracterização do solo quanto à sua propriedade física e propriedade hidráulica, que é o foco e servirá como subsídio para esta pesquisa.

2.1.3.1 Massa específica dos sólidos

A massa específica dos sólidos ou massa específica dos grãos (ρ_s) pode ser definida como a relação entre a massa dos sólidos (M_s) de um determinado solo e o volume de sólidos (V_s) ocupado por eles, como representa a Equação (2). Este ensaio possui como fundamentação teórica o princípio de Arquimedes, em que um corpo ao ser submerso em um líquido desloca um volume igual ao volume do próprio corpo (CAMPOS, *et al.*, 2016).

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (2)$$

em que: ρ_s é a massa específica dos sólidos, em $[ML^{-3}]$, M_s é a massa de sólidos, em $[M]$, V_s é o volume dos sólidos, em $[L^3]$.

No Brasil, a norma técnica que descreve os procedimentos desse ensaio é a NBR 6458:2016 – Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm (ABNT, 2016). A massa específica dos sólidos depende sobretudo da composição mineralógica que, de forma genérica, pode-se dizer que os valores encontram-se

numa faixa de variação de 2,550 a 2,750 g/cm³ para a maioria dos mineirais que compõem o solo e dos argilominerais em uma faixa de 2,700 a 2,850 g/cm³ (MONTALVAN, 2016).

Entretanto, de acordo com o levantamento da literatura técnico-científico da região de Apucarana, é possível encontrar valores de massa específica dos sólidos mais elevados numa faixa de variação entre 2,860 a 3,120 g/cm³ (PUZZI, 2015; TORY, 2017; GARCIA; LUIZ, 2019).

2.1.3.2 Análise granulométrica conjunta

A análise granulométrica conjunta do solo é realizada a partir de ensaios de sedimentação (para determinação da fração fina do solo) e de peneiramento (para determinação da fração grossa do solo), a fim de conhecer a distribuição do tamanho das partículas de solo por meio da curva de distribuição granulométrica (BUENO; VILAR, 1980).

Segundo a NBR 6502:1995 – Rochas e solos (ABNT, 1995), as partículas do solo podem ser classificadas de acordo com seu tamanho em argila, silte, areia (fina, média, grossa) ou pedregulho. A Tabela 1 ilustra os limites referentes ao tipo e tamanho (diâmetro) dessas partículas de solo.

Tabela 1 – Classificação dos solos de acordo com a granulometria

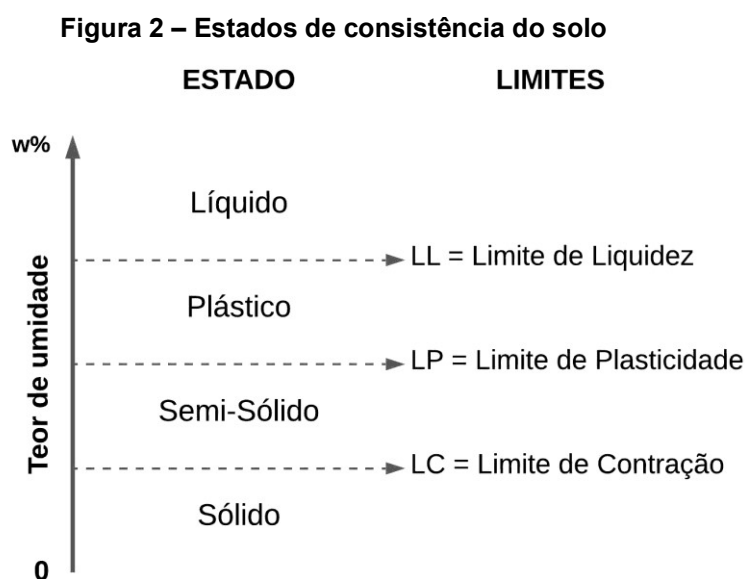
Tipo do solo	Diâmetro (mm)
Argila	Até 0,002
Silte	0,002 a 0,06
Areia fina	0,06 a 0,20
Areia média	0,20 a 0,60
Areia grossa	0,60 a 2,00
Pedregulho	2,00 a 60,0

Fonte: Baseado em NBR 6502:1995 (ABNT, 1995)

No Brasil, a norma técnica que descreve os procedimentos desse ensaio é a NBR 7181:2016 – Solo – Análise granulométrica (ABNT, 2016).

2.1.3.3 Limites de consistência

Os limites de consistência também denominados por limites de Atterberg, foram estabelecidos pelo cientista Albert Mauritz Atterberg, na Suécia em 1911 (CAPUTO, 1996). Esses limites são utilizados para definir os prováveis estados de um solo em função do seu teor de umidade, os quais totalizam quatro estados (líquido, plástico, semi-sólido e sólido) e três limites (Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Limite de Contração). A Figura 2 demonstra esquematicamente a mudança desses estados físicos com seus respectivos limites.



Fonte: Baseado em Caputo (1996)

Portanto, os limites marcam a transição de um estado para outro, em função do teor de umidade do solo. Nesse caso, o Limite de Liquidez (LL) representa a mudança do estado líquido para o estado plástico, podendo ser determinado a partir do aparelho de Casagrande, seguindo os procedimentos da NBR 6459:2016 – Solo – Determinação do limite de liquidez (ABNT, 2016). Já a mudança do estado plástico para o estado semi-sólido é definida pelo Limite de Plasticidade (LP), podendo ser determinado por meio dos procedimentos da NBR 7180:2016 – Solo – Determinação do limite de plasticidade (ABNT, 2016).

2.1.3.4 Permeabilidade

A permeabilidade pode ser estabelecida como a propriedade que o solo possui de permitir o escoamento da água no seu interior através das partículas sólidas, sendo o grau de permeabilidade conhecido como “coeficiente de permeabilidade” (CAPUTO, 1996). O coeficiente de permeabilidade pode ser determinado através da Lei de Darcy, que foi proposta em 1856 pelo engenheiro francês Darcy, o qual verificou que a velocidade de percolação é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico (i), conforme representa a Equação (3) (DIEMER, 2008).

$$v = k i \tag{3}$$

em que: v é a velocidade de percolação, em $[LT^{-1}]$; k é a constante de permeabilidade, em $[LT^{-1}]$; i é o gradiente hidráulico, em [adimensional].

Os ensaios de permeabilidade têm como objetivo determinar a condutividade hidráulica do solo, representada pela letra k . Esta condutividade hidráulica pode ser determinada para condição de solo saturado (denominada como condutividade hidráulica saturada, k_{sat}) e para condição de solo não saturado (denominada como condutividade hidráulica não saturada, $k(\theta)$ ou $k(\phi)$). Para isso, podem ser empregados métodos indiretos, como o uso de equações que o relacionam a condutividade hidráulica com a granulometria de materiais granulares, ou ainda métodos diretos, utilizando ensaios de carga constante e carga variável em laboratório ou pelo ensaio de bombeamento realizado *in loco* (CAPUTO, 1996).

Segundo Durgiewicz e Mattos (2016), a importância do conhecimento do valor da permeabilidade na área da construção civil é devida a ocorrência de problemas graves envolvendo o solo e a água associada “essencialmente, na estimativa da que percolará pelo meio do maciço e da fundação em barragens de terra, em obras de drenagem, rebaixamento do nível de água, adensamento, entre outras aplicações” (PAZETTO *et al.*, 2009, p. 82).

2.2 Condutividade hidráulica dos solos

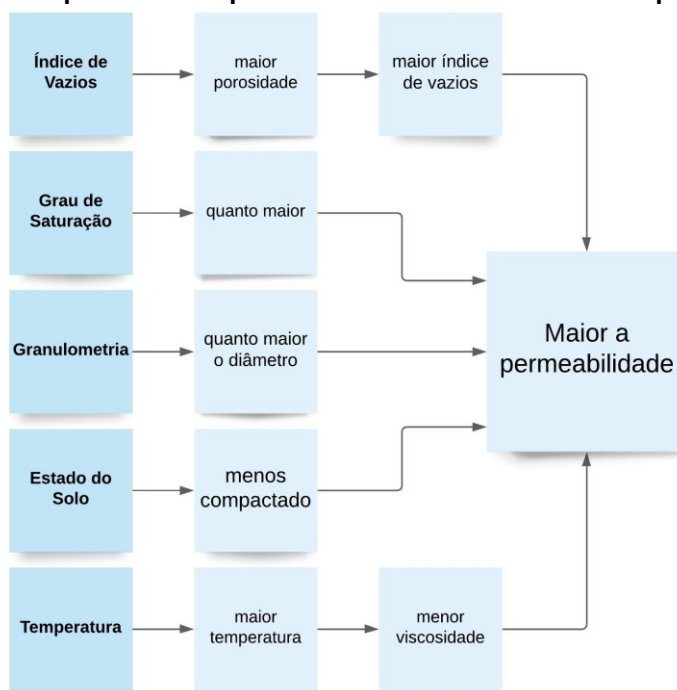
A condutividade hidráulica, também denominado de coeficiente de permeabilidade, está relacionada com as propriedades físicas do meio (característica do solo e do fluido), tanto dos fluidos como das partículas do solo por onde a água passa, retratando a facilidade ou a dificuldade com que a água percola através de seus vazios (SOTO, 1999).

Hiller (1971 *apud* FERNANDES, 2011) ressalta que “a condutividade hidráulica não é apenas uma propriedade do solo, mas sim do conjunto solo e fluido”. Por isso, pensando na unidade final para sua representação, dizemos que “a condutividade é igual ao volume de um fluido que atravessa, por unidade de tempo, 1 unidade de área de uma amostra de um meio poroso sob um gradiente de potencial total de 1 unidade de força/volume” (LIBARDI, 2005, p. 166).

De acordo com Reichardt (1990 *apud* SILVA, 2010), é possível atingir o valor máximo da condutividade hidráulica quando o solo se encontra na condição saturada, a qual denomina-se condutividade hidráulica saturada. A partir desse valor, com auxílio de equações matemáticas, é possível estimar a condutividade hidráulica não saturada (VIEIRA; KLEIN, 2014).

Alguns fatores acabam influenciando no resultado de condutividade hidráulica do solo, tais como: o grau de saturação, a granulometria, o índice de vazios, a temperatura, e o estado do solo (LAMBE; WHITMAN, 1969 *apud* BETIM, 2013). A Figura 3 representa os principais fatores que influenciam nesse parâmetro do solo e as consequências na permeabilidade desse material.

Figura 3 – Principais fatores que influenciam no coeficiente de permeabilidade



Fonte: Baseado em Ribeiro (2010)

Portanto, baseado nos valores de condutividade hidráulica dos diferentes tipos de solo (denominado por coeficiente de permeabilidade), é possível ter uma estimativa do grau de permeabilidade segundo Terzaghi e Peck (1967 *apud* SANTOS, 2005) e do tipo do solo segundo Mello e Teixeira (1967 *apud* SANTOS, 2005), como mostra o Quadro 2.

Quadro 2 – Valores de coeficiente de permeabilidade, grau de permeabilidade e tipo de solo.

Coeficiente de permeabilidade k (cm/s)	Grau de permeabilidade Terzaghi e Peck (1967)	Tipo de solo Mello e Teixeira (1967)
10^9 a 1	Alta	Pedregulhos
1 a 10^{-1}		Areias
10^{-1} a 10^{-3}	Média	Areias finas siltosas e argilosas, siltes argilosos
10^{-3} a 10^{-5}	Baixa	
10^{-5} a 10^{-7}	Muito Baixa	Argilas
$< 10^{-7}$	Praticamente impermeável	

Fonte: Santos (2005)

2.3 Métodos de determinação da condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica pode ser determinada através de métodos diretos ou indiretos (LIBARDI, 2005). Os métodos diretos correspondem aos métodos em que é possível determinar diretamente a condutividade hidráulica seja a partir de ensaios em campo ou ensaios de laboratório. Já os métodos indiretos, são aqueles em que necessitam de correlações empíricas para calcular o valor de condutividade hidráulica.

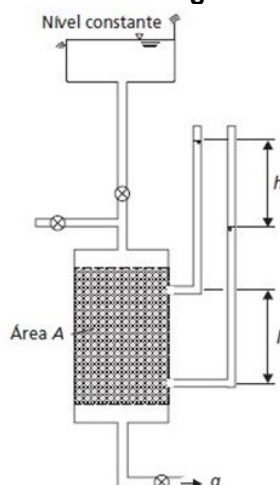
2.3.1 Métodos laboratoriais

Os métodos mais convencionais de ensaios laboratoriais para determinação da condutividade hidráulica consistem no uso de equipamentos denominados de permeômetros. Conforme a característica do solo a ser ensaiado, é indicado o tipo da carga do permeômetro, podendo este ser constante ou variável (NOGUEIRA, 2005 *apud* FERNANDES, 2011). Por mais cauteloso que seja realizado o ensaio, os métodos laboratoriais consideram apenas uma parcela de um volume grande de solo, por isso, podem apresentar uma margem maior de erro. Além disso, a amostra de solo pode não ser tão representativa por conta do local da sua coleta ou até mesmo devido à qualidade dessa amostra, resultando numa determinação de condutividade hidráulica não condizente com o tipo do solo estudado.

2.3.1.1 Permeômetro de carga constante

O permeômetro de carga constante baseia-se em uma repetição da experiência de Darcy e consiste em dois reservatórios onde os níveis de água são mantidos constantes, conforme ilustra a Figura 4. Nesse ensaio, é utilizado o permeômetro de parede rígida e tem-se a medida da área e do comprimento do corpo de prova, sendo realizada as medições de volume em função do tempo transcorrido.

Figura 4 - Permeômetro de carga constante



Fonte: Knappett e Craig (2018)

Esse método de ensaio é indicado para solos granulares de alta permeabilidade, estando os procedimentos de ensaio normatizado pela NBR 13292:1995 – Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante (ABNT, 1995). Nesse ensaio, o valor de condutividade hidráulica do solo pode ser calculado a partir da Equação (4).

$$k = \frac{(qL)}{(Aht)} \quad (4)$$

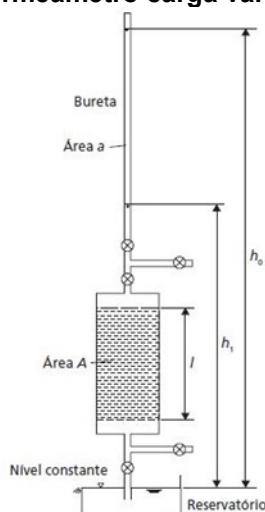
em que: k é a condutividade hidráulica, em $[LT^{-1}]$; q é a quantidade de água medida na proveta, em $[L^3]$; L é o comprimento da amostra na direção do fluxo, em $[L]$; A é a área da amostra perpendicular ao fluxo, em $[L^2]$; h é a diferença do nível entre o reservatório inferior e superior, em $[L]$; t é o tempo médio medido entre o início e o término do ensaio, em $[T]$.

2.3.1.2 Permeômetro de carga variável

O permeômetro de carga variável possui uma bureta graduada onde é possível determinar a vazão e a perda de carga decrescente ao longo do tempo, sendo necessário medir a altura inicial e a altura final do nível de água no interior da bureta

(CAPUTO, 1996). Nesse ensaio, é utilizado o permeâmetro de parede rígida e a Figura 5 representa um esquema desse tipo de ensaio.

Figura 5 - Permeâmetro carga variável



Fonte: Knappett e Craig (2018)

Este método de ensaio é indicado preferencialmente para solos finos, estando os procedimentos de ensaio normatizado pela NBR 14545:2000 - Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável (ABNT, 2000). Nesse ensaio, o valor de condutividade hidráulica do solo pode ser calculado a partir da Equação (5)

$$k = 2,3 \cdot \frac{L \cdot a}{A \cdot t} \cdot \text{Log} \frac{h_0}{h_1} \quad (5)$$

em que: k é a condutividade hidráulica, em $[LT^{-1}]$; L é o comprimento da amostra, em $[L]$, a é a área da seção transversal da bureta, em $[L^2]$, t é o tempo do ensaio, em $[T]$; A é a área da seção transversal, em $[L^2]$; h_0 é a carga hidráulica inicial, em $[L]$; h_1 é a carga hidráulica final, em $[L]$.

2.3.2 Métodos *in situ*

Os métodos realizados em campo, comumente denominados por métodos *in situ*, são realizados excepcionalmente em projetos importantes, visto que, além de

muitos oferecerem facilidade e praticidade de uso, fornecem uma boa representatividade justamente por envolver um grande volume de solo, fornecendo valores médios de condutividade hidráulica baseado nas variações locais (MAGALHÃES, 2015). Nesta revisão bibliográfica serão abordados alguns dos principais tipos de métodos *in situ* de permeabilidade, sendo eles: ensaio de bombeamento, ensaio de tubo aberto, infiltrômetro duplo anel, infiltrômetro a disco e o permeâmetro Guelph.

2.3.2.1 Ensaio de bombeamento

O ensaio de bombeamento permite determinar o coeficiente de permeabilidade de uma camada de areia ou de pedregulho, ambos situados abaixo do nível d'água (CAPUTO, 1996). A Figura 6 representa o ensaio esquematizado em camada de areia localizada abaixo do lençol freático, contendo três poços sendo um deles denominado de poço filtrante e outros dois de poços de testemunhas (CAPUTO, 1996). Este ensaio consiste “em esgotar-se a água até o estabelecimento de um escoamento uniforme, medir a descarga do poço e observar a variação do nível d'água em piezômetros colocados nas proximidades” (SAYÃO; SIEIRA; SANTOS, 2013, p. 38).

Figura 6 – Esquema do ensaio de bombeamento



Fonte: Sayão, Sieira e Santos (2003)

Como afirma Caputo (1996), o cálculo de condutividade hidráulica (k) pode ser feita pelo ensaio de bombeamento, representado pela Equação (6).

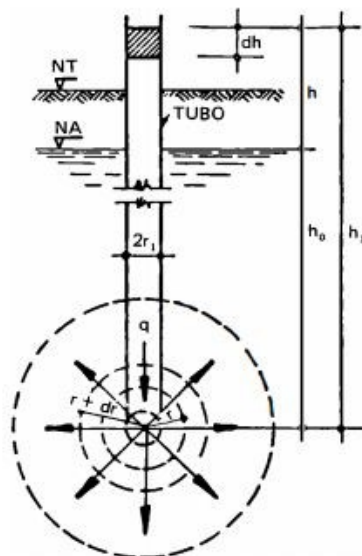
$$k = \frac{2,3 \cdot q \cdot \text{Log} \frac{x_2}{x_1}}{\pi (y_2^2 - y_1^2)} \quad (6)$$

em que: k é a condutividade hidráulica, em $[LT^{-1}]$; q é a densidade de fluxo, em $[LT^{-1}]$; x_1 e x_2 são as distâncias de dois poços de observação, em $[L]$; y_1 e y_2 são as cargas hidráulicas, em $[L]$.

2.3.2.2 Ensaio de tubo aberto ou de infiltração

O ensaio de tubo aberto é utilizado principalmente em solos finos, e que consiste em cravar o tubo até uma altura desejada no terreno e despejar água para ocorrer seu escoamento (CAPUTO, 1996). No processo do ensaio, realizam-se leituras do nível de água no revestimento do furo e do tempo cronometrado. A Figura 7 ilustra o esquema desse ensaio em campo.

Figura 7 – Ensaio de tubo aberto esquematizado



Fonte: Caputo (1996)

O cálculo da condutividade hidráulica resultante deste ensaio pode ser determinado por meio da Equação (7).

$$k = \left(\frac{r_1}{4h}\right) \cdot \left(\frac{\Delta h}{\Delta t}\right) \quad (7)$$

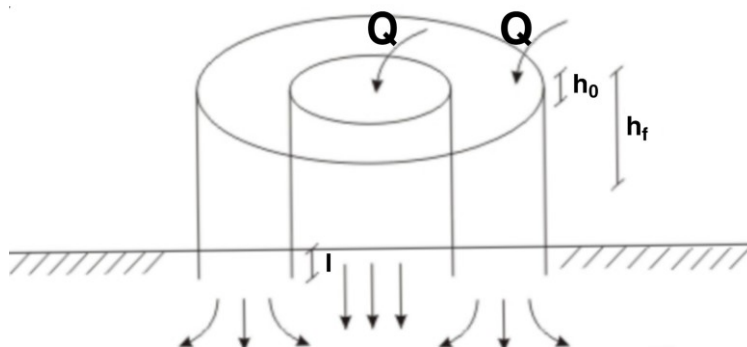
em que: k é a condutividade hidráulica, em $[LT^{-1}]$; r_1 representa o raio do furo, em $[L]$; h a altura da carga hidráulica em $[L]$; Δh a variação de altura da carga hidráulica, em $[L]$; Δt representa a variação de tempo do ensaio, em $[T]$.

2.3.2.3 Infiltrômetro do duplo anel

O infiltrômetro do duplo anel, também conhecido como infiltrômetro de anéis concêntricos, é utilizado para determinar a condutividade hidráulica na superfície, no qual são posicionados dois anéis de maneira concêntrica. Os anéis são feitos de chapa de aço, sendo que o anel de menor diâmetro (anel interno) possui uma régua graduada para que sejam feitas as leituras das variações do nível d'água.

No Brasil não existe uma norma padronizando este ensaio, entretanto, é possível seguir os procedimentos da norma americana ASTM D3385:1988 – *Infiltration rate of soils in field using double-ring infiltrometer* (ASTM, 1988). Um esquema do infiltrômetro do duplo anel pode ser visto da Figura 8, onde Q representa o volume de água inserido, h_0 e h_f representam, respectivamente, a carga hidráulica inicial e final (em relação ao anel interno) e l representa a profundidade de cravação dos anéis no solo.

Figura 8 – Infiltrômetro duplo anel esquematizado



Fonte: adaptado de Fiori (2010)

Portanto, a condutividade hidráulica realizada pode ser determinada por meio deste ensaio utilizando a Equação (8).

$$k = U \frac{I}{\Delta t} \ln \frac{h_0}{h_f} \quad (8)$$

em que: U representa o fator de conversão de unidades, em [adimensional]; I é a profundidade de cravação, em [L]; h_0 é a carga hidráulica inicial, em [L]; h_f é a carga hidráulica final, em [L]; Δt é o tempo de duração do ensaio, em [T].

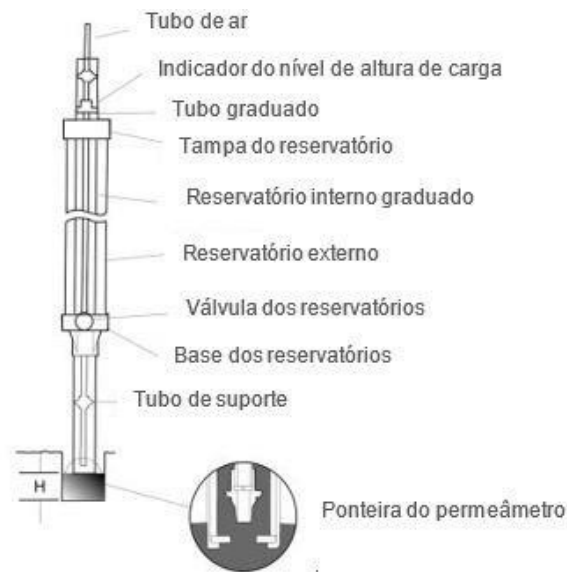
2.3.2.4 Permeâmetro Guelph

O permeâmetro Guelph foi elaborado e aperfeiçoado por Reynolds e Elrick nos anos de 1983 e 1985, na *University of Guelph*, no Canadá. Devido ao equipamento ser de fácil manuseio, ter um método de cálculo padronizado e gerar menor impacto ao solo, faz com que ele seja apropriado para diversos tipos de aplicações, dentre elas: sistemas de irrigação e drenagem, hidrogeologia, reservatórios e aterros sanitários (SOTO, 1999).

O equipamento funciona de acordo com o princípio do tubo de Mariotte, em que, permite controlar a carga hidráulica constante no interior do furo. Este equipamento possibilita determinar valores de condutividade hidráulica saturada de campo (k_{fs}), potencial matricial de fluxo (ϕ_{Gm}) e sorção do solo (α) (SOTO, 1999). Além disso, pode ser empregado nos ensaios em solos argilosos e em solos arenosos, apresentando como principais vantagens rapidez no ensaio, baixo consumo de água (0,5 a 2 litros) e facilidade na operação. Também apresenta algumas desvantagens como limitação da profundidade de ensaio, tendo este que ser realizado em profundidades inferiores à 1 metro da superfície do terreno (SUPO, 2008).

A Figura 9 representa um esquema do permeâmetro Guelph, apresentando seus principais componentes: dois reservatórios de água (interno e externo), uma ponteira, um tubo de ar, um tubo graduado e um tubo de suporte. No kit do equipamento também constam: um tripé para apoio, uma bomba a vácuo, ferramentas para escavação e regularização do furo do ensaio e um recipiente para transporte e armazenamento de água.

Figura 9 – Permeâmetro Guelph esquematizado



Fonte: Macías, Vargas e Arellano (2018)

Existem várias técnicas de ensaio com o permeâmetro Guelph, destacando-se duas principais denominadas de técnica de uma altura de carga (ELRICK, *et al.*, 1989) e de técnica de duas alturas de carga (REYNOLDS; ELRICK, 1985).

No caso da técnica de uma altura sugerida por Elrick *et al.* (1989), os parâmetros denominados de condutividade hidráulica saturada de campo (k_{fs}) e potencial matricial de fluxo (ϕ_{Gm}) são calculados de acordo com a Equação (9) e Equação (10), respectivamente.

$$k_{fs} = \frac{CQ}{\left[2\pi H^2 + \pi a^2 C + 2\pi \left(\frac{H}{\alpha}\right)\right]} \quad (9)$$

$$\phi_{Gm} = \frac{CQ}{\left[(2\pi H^2 + \pi a^2 C)\alpha + 2\pi H\right]} \quad (10)$$

em que: k_{fs} expressa a condutividade hidráulica saturada, em $[LT^{-1}]$; H é a altura de carga hidráulica utilizada no ensaio, em [L]; ϕ_{Gm} é o potencial matricial de fluxo, em $[L^2T^{-1}]$; a é o raio do furo de sondagem, em [L]; C corresponde ao fator de forma e que depende da relação entre H/a e do tipo de solo, em [adimensional]; Q é a vazão em regime permanente e que depende da utilização de um ou dois reservatórios de água,

em [LT⁻¹]; α corresponde ao parâmetro sugerido (Tabela 2) por Elrick *et al.* (1989), sendo que o valor adotado depende do tipo do solo.

Tabela 2 – Valores de α sugeridos por Elrick *et al.* (1989)

α (cm ⁻¹)	TIPO 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

Fonte: Soto, Chang e Vilar (2009).

Já no caso da técnica de duas alturas de carga sugerida por Reynolds e Elrick (1985), são necessárias duas medidas de vazão realizadas a partir do emprego de duas alturas de carga hidráulica diferentes (SOTO, 1999). Os parâmetros denominados de condutividade hidráulica saturada de campo (k_{fs}) e potencial matricial de fluxo (ϕ_{Gm}) são determinados a partir da solução simultânea da Equação (11) e da Equação (12).

$$Q_{pg1} = \left(\frac{2\pi H_{pg1}^2}{C_1} + \pi a^2 \right) k_{fs} + \left(\frac{2\pi H_{pg1}}{C_1} \right) \phi_{Gm} \quad (11)$$

$$Q_{pg2} = \left(\frac{2\pi H_{pg2}^2}{C_2} + \pi a^2 \right) k_{fs} + \left(\frac{2\pi H_{pg2}}{C_2} \right) \phi_{Gm} \quad (12)$$

em que: Q_{pg1} é vazão em carga permanente cara a altura de carga hidráulica H_{pg1} , em [L³T⁻¹]; H_{pg1} é a primeira altura de carga, em [L]; C_1 é o parâmetro fator forma e depende do tipo de solo e H_{pg1}/a , em [adimensional]; a é o raio do furo, em [L]; k_{fs} é a condutividade hidráulica saturada, em [LT⁻¹]; ϕ_{Gm} é o potencial matricial de fluxo, em [L²T⁻¹]; Q_{pg2} é vazão em carga permanente cara a altura de carga hidráulica H_{pg2} em [L³T⁻¹]; H_{pg2} é a primeira altura de carga, em [L]; C_2 é o parâmetro fator forma e depende do tipo de solo e H_{pg2}/a , em [adimensional].

Além disso, também é possível realizar uma estimativa do parâmetro α através da Equação (13), onde são empregados os valores calculados referentes aos parâmetros de condutividade hidráulica saturada de campo e do potencial matricial de fluxo (FERNANDES, 2011). Com isso, mediante utilização da equação empírica de Gardner (1958), pode-se ter uma estimativa dos valores de condutividade hidráulica não saturada em função do potencial matricial do solo, conforme mostra a Equação (14).

$$\alpha = \frac{k_{fs}}{\phi_{Gm}} \quad (13)$$

$$k(\phi) = k_{fs} \cdot e^{\alpha \cdot \phi} \quad (14)$$

em que: α é um parâmetro do solo, em [adimensional]; k_{fs} é a condutividade hidráulica saturada do solo em campo, em [LT^{-1}]; ϕ_{Gm} é o potencial matricial, em [L^2T^{-1}]; $k(\phi)$ é a condutividade hidráulica não saturada do solo, em [LT^{-1}] e ϕ é o potencial matricial do solo, em [L].

2.3.3 Métodos indiretos

Os métodos indiretos, também conhecidos como métodos empíricos, possuem como base os índices de distribuição da curva granulométrica e o ensaio de adensamento (PANTOJA, 2019). Embora esses métodos forneçam uma boa estimativa para a constante da permeabilidade, eles ainda não costumam ser os mais utilizados em pesquisas mais aprofundadas acerca da condutividade hidráulica (LEITE, 2017).

2.4 Pesquisas na área de permeabilidade em solos da região norte do Paraná

Em um levantamento realizado na literatura técnico-científica nacional e internacional acerca do tema de permeabilidade foi possível encontrar diversos

trabalhos relacionados com o conteúdo deste projeto de pesquisa. Alguns desses trabalhos consultados foram desenvolvidos no solo da mesma região em que serão conduzidos os ensaios desta pesquisa (denominada como área de estudo), inclusive utilizando o mesmo tipo equipamento denominado como permeâmetro Guelph. Por esse motivo, encontram-se descritos a seguir os principais aspectos e resultados das pesquisas de permeabilidade utilizando permeâmetro Guelph e desenvolvidas próximas da área de estudo deste projeto de pesquisa.

Sousa e Celligoi (2011) determinaram a condutividade hidráulica saturada para duas áreas distintas situadas no município de Londrina, Estado do Paraná, sendo estas denominadas como A1 (área florestada sobre um solo do tipo Latossolo) e A2 (área agrícola sobre um solo do tipo Nitossolo). Os ensaios de permeabilidade foram conduzidos através do emprego da técnica de uma altura de carga e de duas alturas de carga, todos sendo realizados numa profundidade de 0,35 m em relação ao nível do terreno. A partir dos resultados dos ensaios, os autores determinaram valores de condutividade hidráulica saturada na ordem de $1,8 \cdot 10^{-3}$ a $7,7 \cdot 10^{-3}$ cm/s para a área florestada e de $1,4 \cdot 10^{-4}$ a $1,1 \cdot 10^{-3}$ cm/s para a área agrícola.

Barbosa (2014) determinou a condutividade hidráulica saturada em um antigo depósito de resíduos sólidos sobre um solo classificado como Latossolo, localizado no município de Rolândia, Estado do Paraná. Os ensaios de permeabilidade foram realizados com o uso do permeâmetro Guelph e conduzidos para três localidades diferentes do depósito, denominadas como cobertura, talude e jusante. A condutividade hidráulica saturada resultante variou na faixa de $1,3 \cdot 10^{-5}$ a $1,9 \cdot 10^{-4}$ cm/s.

Puzzi (2015) realizou uma pesquisa sobre trincheiras de infiltração e a determinação da condutividade hidráulica foi realizada por meio do permeâmetro Guelph. O estudo foi conduzido num solo do tipo Latossolo, localizado na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, do município de Londrina, Estado do Paraná. Os ensaios de permeabilidade foram realizados a uma profundidade de aproximadamente 0,30 m do nível do terreno e o valor estimado de condutividade hidráulica saturada foi de $5,5 \cdot 10^{-3}$ cm/s.

Rodriguez *et al.* (2015) empregaram quatro tipos diferentes de métodos de ensaio para determinação da condutividade hidráulica: permeâmetro de carga constante, permeâmetro de carga variável, infiltrômetro do duplo anel e permeâmetro Guelph. A área de estudo escolhida para conduzir os ensaios é constituída por

Latossolo e está localizada no Campo Experimental de Engenharia Geotécnica (CEEG) da Universidade Estadual de Londrina (UEL), no município de Londrina, Estado do Paraná. Todos os métodos de ensaio apresentaram uma variação na ordem de 10^{-4} a 10^{-3} cm/s, sendo que, com o permeâmetro Guelph, o valor estimado de condutividade hidráulica saturada foi de $3,7 \cdot 10^{-4}$ cm/s.

A Tabela 3 reúne os principais aspectos (tipo de solo e localidade) assim como os resultados de condutividade hidráulica de todas as pesquisas mencionadas anteriormente. Esses valores de permeabilidade apresentados na Tabela 4 serão utilizados para confrontar com os resultados deste projeto de pesquisa, a fim de averiguar se a faixa de variação ficará próxima com os das pesquisas consultadas para confecção deste trabalho.

Tabela 3 – Valores da condutividade hidráulica encontrados na literatura técnico científica

Pesquisa	Município	Tipo do solo	k (cm/s)
Sousa e Celligoi (2011)	Londrina	Latossolo	$1,8 \cdot 10^{-3}$ a $7,7 \cdot 10^{-3}$
		Nitossolo	$1,4 \cdot 10^{-4}$ a $1,1 \cdot 10^{-3}$
Barbosa (2014)	Rolândia	Latossolo	$1,3 \cdot 10^{-5}$ a $1,9 \cdot 10^{-4}$
Puzzi (2015)	Londrina	Latossolo	$5,5 \cdot 10^{-3}$
Rodriguez <i>et al.</i> (2015)	Londrina	Latossolo	$3,7 \cdot 10^{-4}$

Fonte: Autoria Própria (2020)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentadas as diretrizes empregadas para a estruturação da presente monografia, tendo como foco principal apresentar as características da área de estudo e descrever o procedimento para realização dos ensaios de permeabilidade e de caracterização do solo.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho tanto para a realização dos ensaios de permeabilidade quanto para os ensaios de caracterização estão listados no Quadro 3.

Quadro 3 – Materiais e equipamentos utilizados no decorrer desta pesquisa

Materiais e equipamentos utilizados	Finalidade
Permeâmetro Guelph	Ensaio de permeabilidade
Reservatório pequeno	Armazenamento de água
Sacos plásticos	Armazenamento das amostras de solo
Cápsulas metálicas	Determinação do teor de umidade
Balança	Pesagem do solo
Estufa	Secagem das amostras de solo
Aparelho de Casagrande	Ensaio de Limite de Liquidez
Placa de vidro esmerilhada com gabarito	Ensaio de Limite de Plasticidade
Peneiras graduadas	Análise Granulométrica Conjunta
Agitador mecânico	Análise Granulométrica Conjunta
Hexametáfosfato de sódio	Análise Granulométrica Conjunta
Densímetro de bulbo simétrico	Análise Granulométrica Conjunta
Termômetro	Análise Granulométrica Conjunta
Espátulas	Uso geral

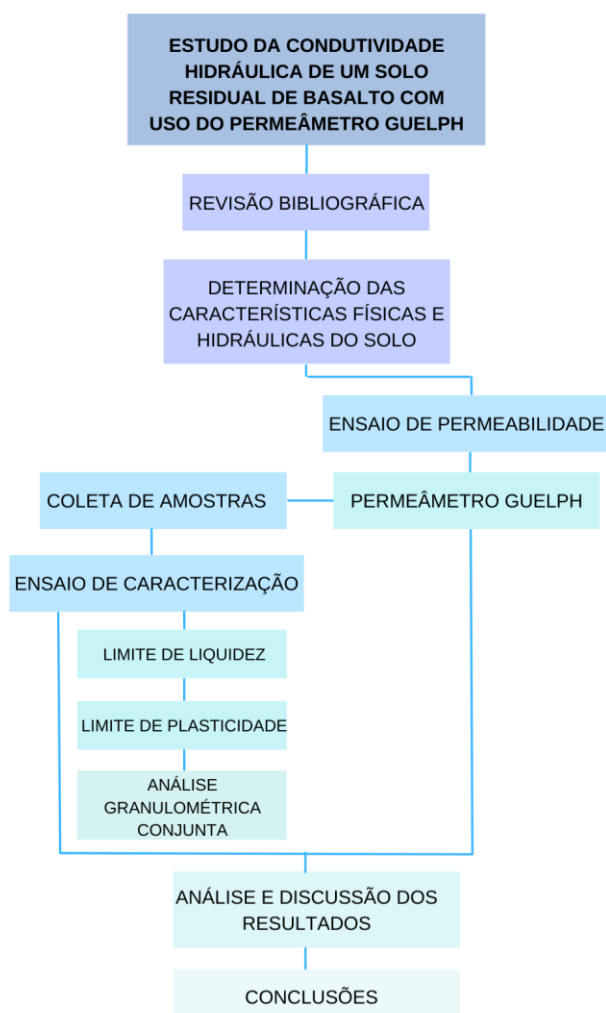
Fonte: Autoria Própria (2021)

Os pontos referentes aos locais escolhidos para a realização dos ensaios foram georeferenciados através do software ArcGIS Pro (2022, 2.8.5, Estudante) e as coordenadas geográficas de cada furo foram anotadas através do Google Earth Pro (2021, 7.8).

3.2 Metodologia

A Figura 10 apresenta o fluxograma de maneira sintetizada a metodologia desenvolvida na realização desta pesquisa.

Figura 10 – Metodologia da pesquisa



Fonte: Autoria Própria (2021)

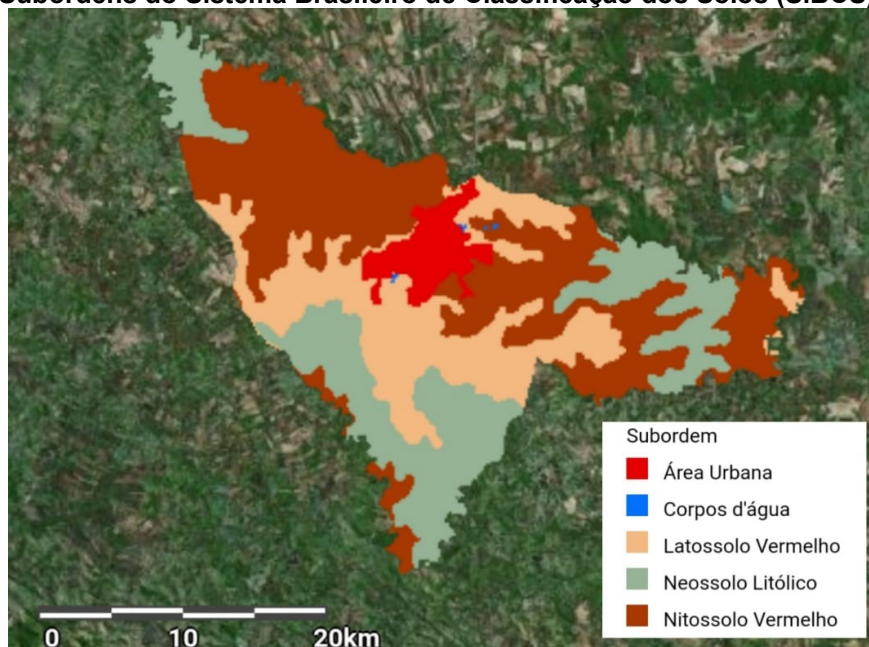
3.2.1 Área de estudo

A área de estudo selecionada para o desenvolvimento desta pesquisa pertence ao município de Apucarana, Estado do Paraná. O município está situado numa região pertencente à Formação da Serra Geral em que o solo da região é de

origem basáltica, podendo haver diferentes tipos de solos de acordo com o Sistema de Classificação Brasileiro de Solos (SiBCS), os quais podem variar em função da topografia do terreno. Na área urbana do município é possível encontrar solos profundos, bem drenados e com grande potencial de utilização, os quais são denominados como Latossolo Vermelho ou Nitossolo Vermelho. Já nas áreas de encostas bem declivosas e mais afastadas da área urbana, pode-se encontrar os solos do tipo Neossolo Litólico, que corresponde a um solo raso, bem drenado e sujeito à erosão (DUTRA, 2014).

A Figura 11 apresenta a distribuição dos tipos de solos (Latossolo Vermelho, Nitossolo Vermelho e Neossolo Litólico) na área do município de Apucarana, estando também apontado na mesma figura a mancha da área urbana e a indicação da presença de corpos d'água.

Figura 11 - Subordens do Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SiBCS) - Apucarana



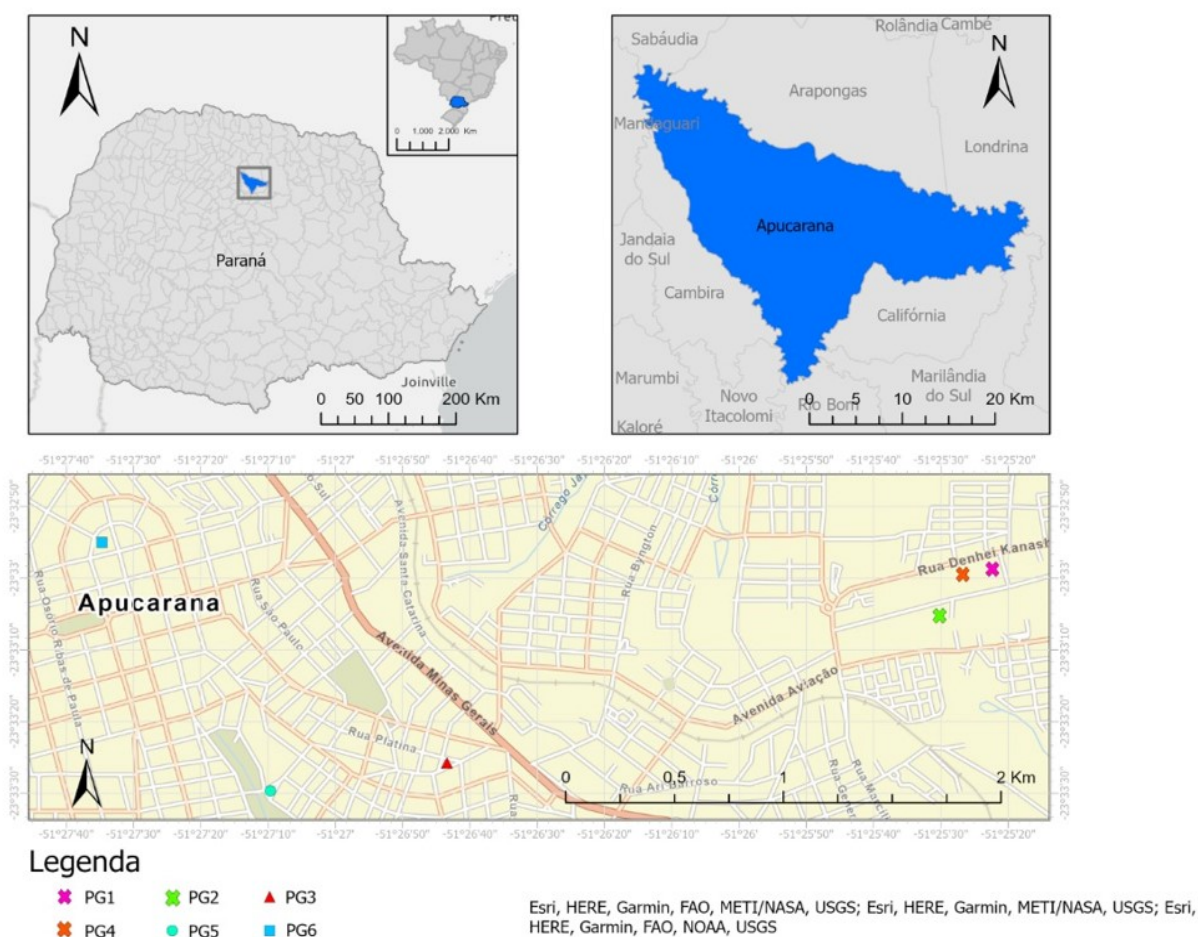
Fonte: IBGE (2020)

Os locais escolhidos para realização dos ensaios estão quase que em sua totalidade situados em praças ou parques públicos do município, em que, acredita-se que nesses locais o solo esteja na condição mais próxima do seu estado natural (sem perturbação) de modo com que não sofra influência devido aos efeitos de compactação próximos à superfície, por exemplo. A escolha de cada local para ensaio

partiu da ideia de que esses terrenos estivessem distantes entre si e fossem localizados em diferentes cotas altimétricas.

Na Figura 12 é possível visualizar no mapa do município os locais em que foram conduzidos os ensaios, onde os pontos denominados por PG fazem referência ao nome do equipamento que será utilizado na determinação da condutividade hidráulica (Permeâmetro Guelph – PG), estando também seguido da numeração para identificação de cada um desses locais. Já a Tabela 4 apresenta informações mais específicas de cada localidade contendo identificação (ID), nome da praça ou da universidade, altitude, latitude e longitude.

Figura 12 – Locais escolhidos para realização dos ensaios de permeabilidade no município de Apucarana (PG1 ao PG6)



Fonte: Autoria Própria (2021)

Tabela 4 – Identificação dos pontos em que serão realizados ensaios de permeabilidade

ID	Local	Altitude	Latitude	Longitude
PG1	UTFPR – atrás do Bloco P	834,0 m	23°33'00.66"S	51°25'32.08"O
PG2	UTFPR – futura quadra	839,0 m	23°33'05.60"S	51°25'33.47"O
PG3	Praça das Mães	863,0 m	23°33'25.65"S	51°26'43.42"O
PG4	UTFPR – futuro Bloco O	835,0 m	23°33'01.34"S	51°25'34.45"O
PG5	Praça da Bíblia	798,0 m	23°33'29.49"S	51°27'9.16"O
PG6	Praça Semíramis Braga	870,0 m	23°32'56.49"S	51°27'35.17"O

Fonte: Autoria Própria (2021)

Como algumas dessas localidades são de domínio do órgão público municipal (Praça das Mães, Praça da Bíblia e Praça Semíramis Braga), qualquer tipo de utilização da área escolhida deverá ser feita mediante autorização prévia junto ao órgão público local. Portanto, antes do desenvolvimento dos ensaios nessas localidades, realizou-se uma solicitação através de um ofício destinado ao Departamento de Secretaria de Obras da Prefeitura Municipal de Apucarana, ao qual foi obtida autorização para execução dos ensaios pela engenheira responsável do departamento (ANEXO A).

Em cada local escolhido foram realizados 2 furos para conduzir os ensaios de permeabilidade assim como a coleta do solo retirado na abertura do furo. Para fins de distinguir e facilitar a identificação dos pontos dos ensaios, cada furo recebeu a denominação “a” ou “b”, sendo essa numeração acrescentada na identificação desses locais (Tabela 5). No total foram realizados 12 ensaios de permeabilidade na presente pesquisa, estando na Tabela 5 apresentadas as informações de cada um desses furos.

Tabela 5 – Identificação dos furos para os ensaios de permeabilidade *in situ***(continua)**

Identificação	Nome	Latitude	Longitude
PG1a	UTFPR – atrás do Bloco P	23°33'00.40"S	51°25'32.37"O
PG1b		23°33'00.37"S	51°25'32.31"O
PG2a	UTFPR – futura quadra	23°33'05.14"S	51°25'33.36"O
PG2b		23°33'05.34"S	51°25'33.27"O

Tabela 5 – Identificação dos furos para os ensaios de permeabilidade *in situ* (conclusão)

Identificação	Nome	Latitude	Longitude
PG3a	Praça das Mães	23°33'25.65"S	51°26'42.86"O
PG3b		23°33'25.91"S	51°26'42.80"O
PG4a	UTFPR – futuro Bloco O	23°33'01.08"S	51°25'34.24"O
PG4b		23°33'01.15"S	51°25'34.53"O
PG5a	Praça da Bíblia	23°33'29.37"S	51°27'09.26"O
PG5b		23°33'29.78"S	51°27'09.85"O
PG6a	Praça Semíramis Braga	23°32'53.69"S	51°27'34.00"O
PG6b		23°32'53.92"S	51°27'34.16"O

Fonte: Autoria Própria (2021)

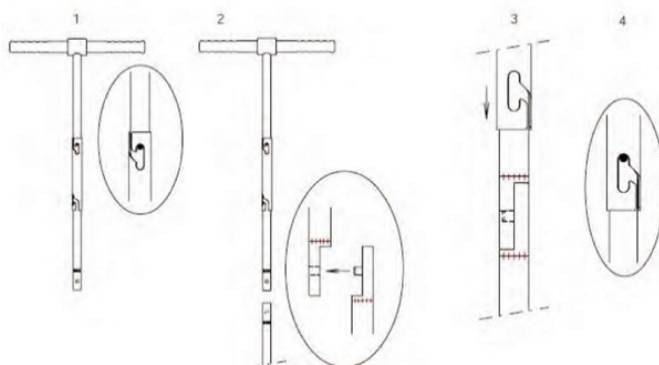
3.3 Ensaio de permeabilidade

O ensaio de permeabilidade foi conduzido em campo, na área de estudo escolhida, com emprego do Permeômetro Guelph modelo 2800k1. Este ensaio consiste em aplicar uma carga hidráulica constante no solo, o qual funciona a partir do princípio do frasco de Mariotte, permitindo o escoamento da água no interior do equipamento a uma velocidade constante através do equilíbrio entre a pressão atmosférica e a pressão interna do permeômetro Guelph (PUZZI, 2011; SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP., 2012).

O estojo portátil do equipamento contém todos os materiais e utensílios necessários para a realização do ensaio, sendo apenas necessário cumprir os seguintes procedimentos básicos para operacionalização do equipamento em campo como abertura do furo de sondagem, montagem e instalação do equipamento no furo.

Para a abertura do furo de sondagem no terreno foi utilizado um trado composto por haste metálica e cruzeta, no qual foi encaixado três tipos de ponta: perfuração, fundo reto e escova. A Figura 13 ilustra o esquema de montagem do trado, destacando para o sistema de encaixe das hastes metálicas.

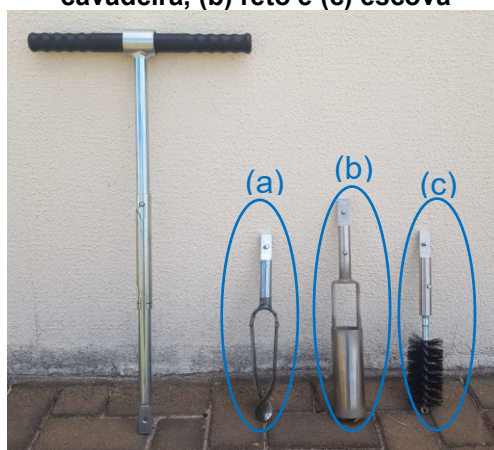
Figura 13 – Encaixe do trado esquematizado



Fonte: Moilsture (2012)

A Figura 14 apresenta a montagem da cruzeta e da haste assim como os três tipos de trado para encaixe na haste metálica utilizado na abertura do furo de sondagem. Portanto, primeiramente foi feita a abertura do furo de sondagem com a peça tipo cavadeira até a profundidade desejada, no caso destes ensaios foram de 0,45m. Na sequência, o trado cavadeira foi substituído pelo trado reto, para que fosse nivelada a base do furo e regularizada as laterais do solo. Por fim, utilizou-se o trado escova, que tem como finalidade produzir fissuras no solo para deixá-lo semelhante à sua condição natural. Em todos os ensaios foram coletadas e armazenadas amostras deformadas do material retirado durante a abertura do furo em sacos plásticos devidamente identificados, para posteriormente, realizar os ensaios de análise granulométrica conjunta, limite de plasticidade e limite de liquidez em laboratório.

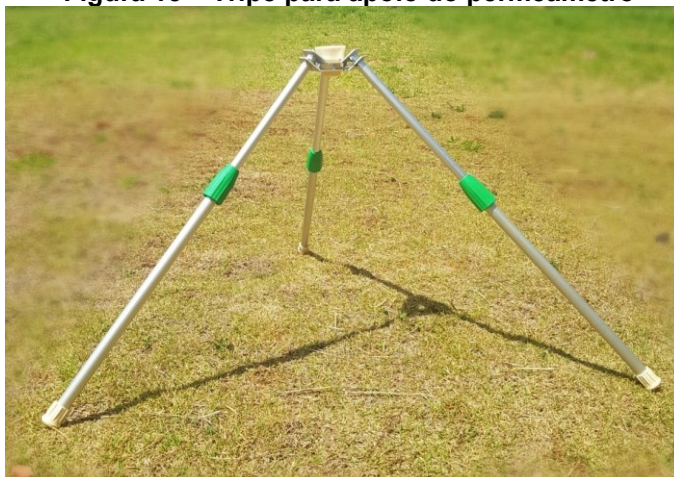
Figura 14 – Material utilizado na abertura do furo de sondagem destacando-se (a) trado cavadeira, (b) reto e (c) escova



Fonte: Autoria Própria (2020)

Antes de iniciar a montagem da estrutura do permeâmetro, foi necessário montar o tripé do equipamento próximo ao furo de sondagem, como ilustra a Figura 15. O tripé tem como função garantir o apoio do equipamento para que, caso a superfície do terreno seja irregular, possa fazer ajustes nos seus apoios, de modo com que o equipamento sempre mantenha a água presente no interior do(s) reservatório(s) nivelada.

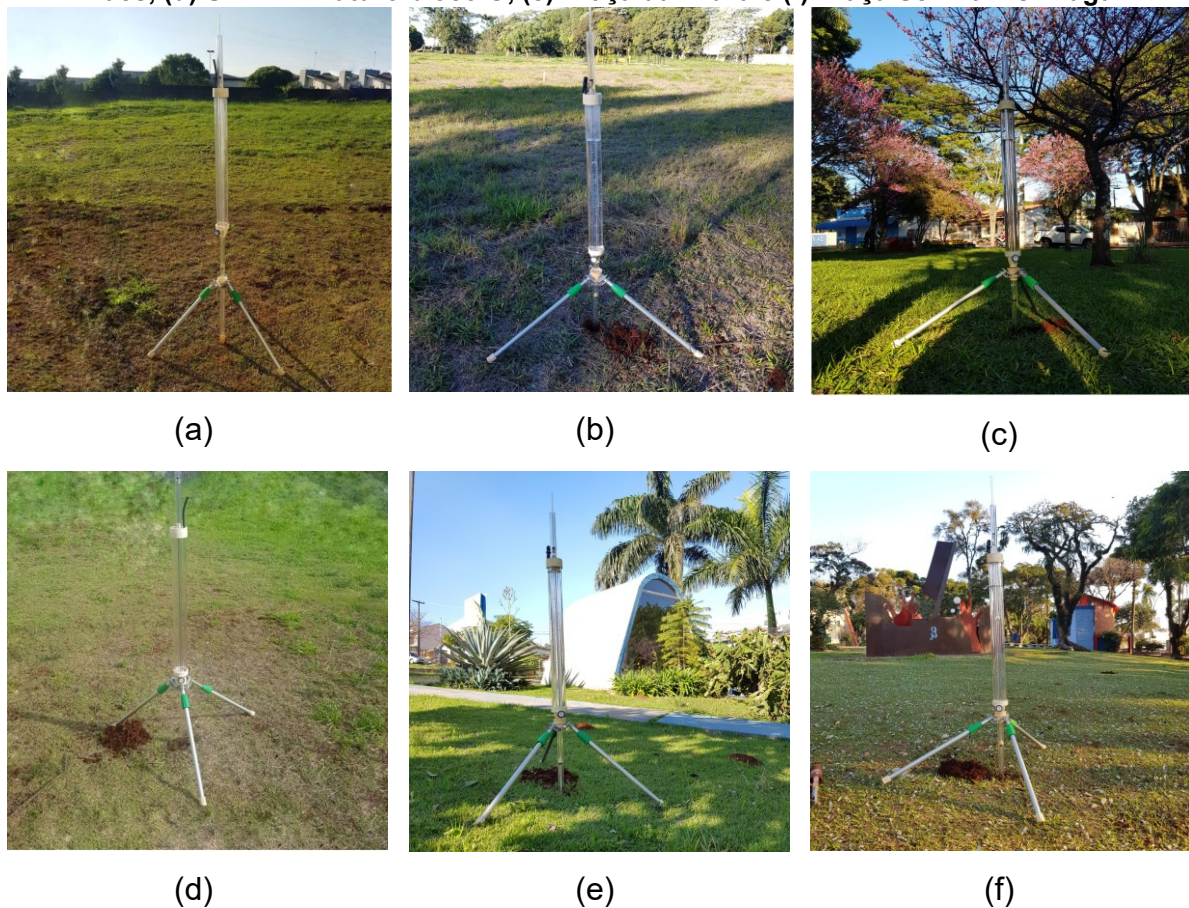
Figura 15 – Tripé para apoio do permeâmetro



Fonte: Autoria Própria (2020)

Na montagem do permeâmetro foram utilizadas as instruções presentes no Manual de instruções do equipamento fornecidas pelo fabricante do equipamento, em que os cilindros de acrílico (como reservatórios e tubos) foram conectados cuidadosamente entre si, de forma com que a estrutura esteja firme, não comprometendo sua vedação e funcionamento. Posteriormente, instalou-se o equipamento no tripé, tomando-se o cuidado para posicionar a parte inferior da ponteira no interior do furo de sondagem até que o mesmo encoste na base do furo. A Figura 16 mostra o Permeâmetro Guelph instalado em todos os locais escolhidos para a realização dos ensaios: UTFPR – atrás do bloco P, UTFPR – futura quadra, Praça das Mães, UTFPR – futuro bloco O, Praça da Bíblia e Praça Semíramis Braga.

Figura 16 – Permeâmetro montado posicionado dentro do furo de sondagem nas seis localidades, sendo elas: (a) UTFPR – atrás do bloco P, (b) UTFPR – futura quadra, (c) Praça das mães, (d) UTFPR – futuro bloco O, (e) Praça da Bíblia e (f) Praça Semíramis Braga



Fonte: Autoria Própria (2021)

Outros itens importantes que foram utilizados antes do início de cada ensaio encontram-se ilustrados na Figura 17 sendo eles: bomba de vácuo, recipiente portátil para armazenamento de água e nível bolha. Sequencialmente, utilizou-se o nível bolha para aferir se o equipamento estava nivelado, introduziu-se a água do recipiente portátil para o interior do reservatório do equipamento e por fim, a bomba de vácuo, que ao aplicar um vácuo de 20 kPa dentro do reservatório, evita a queda indesejada de água.

Figura 17 – Demais itens que compõem o kit do Permeâmetro Guelph – bomba de vácuo, recipiente portátil para armazenamento de água e nível bolha



Fonte: Aatoria Própria (2020)

A escolha da altura de carga fica a critério do operador do ensaio sendo nesta pesquisa utilizadas três alturas de carga: 5 cm, 10 cm e 15 cm. A altura foi alterada levantando cuidadosamente o tubo de ar até a altura desejada no indicador. A Figura 19 exemplifica o equipamento em funcionamento, aplicando uma altura de carga de 10 cm no interior do furo.

Figura 18 – Altura de carga em torno de 10 cm



Fonte: Aatoria Própria (2020)

Quando atingiu a altura de carga desejada, foi disparado um cronômetro para iniciar o ensaio. Na sequência, foram feitas leituras na régua graduada do reservatório (interno e/ou externo) em intervalos constantes de tempo. O ensaio se encerrou quando, no mínimo três leituras consecutivas, apresentaram a mesma variação. A Figura 19 apresenta o modelo de ficha utilizada em campo para o registro dos ensaios.

Figura 19 – Modelo de ficha utilizada

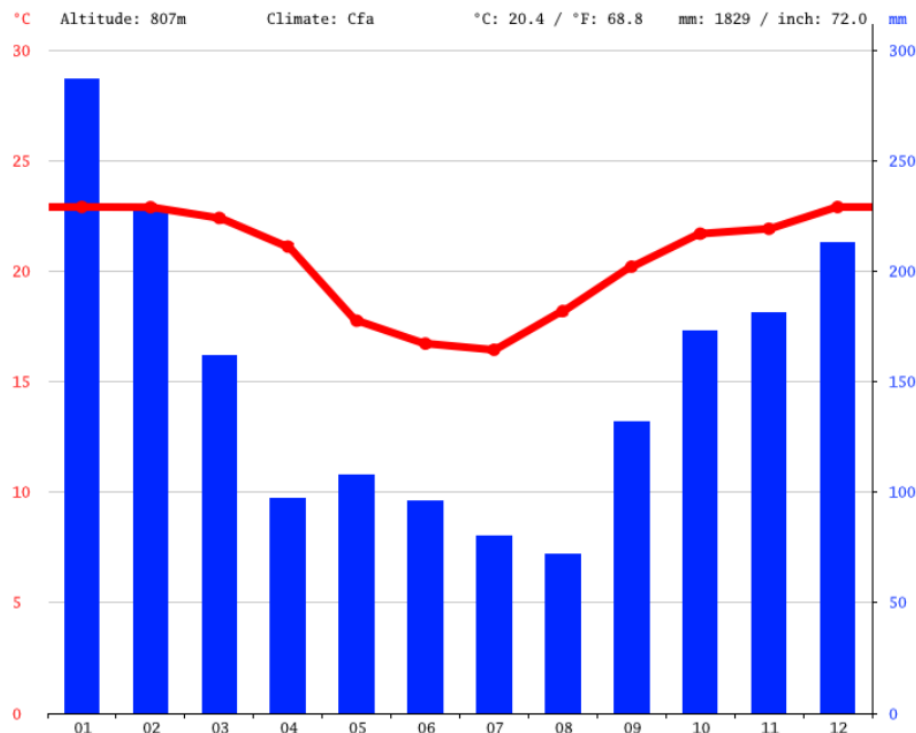
ENSAIO DE PERMEABILIDADE						ID:					
LOCAL:						DATA:					
PRODUNDIDADE:				Raio:			Reservatório				
Altura de carga (H1):				Altura de carga (H2):				Altura de carga (H3):			
Nº Leitura	T	Nível de água (cm)	Varição de água (cm)	Nº Leitura	T	Nível de água (cm)	Varição de água (cm)	Nº Leitura	T	Nível de água (cm)	Varição de água (cm)
1				1				1			
2				2				2			
3				3				3			
4				4				4			
5				5				5			
6				6				6			
7				7				7			
8				8				8			
9				9				9			
10				10				10			
11				11				11			
12				12				12			
13				13				13			
14				14				14			
15				15				15			
16				16				16			
17				17				17			
18				18				18			
19				19				19			
20				20				20			
21				21				21			
22				22				22			
23				23				23			
24				24				24			
25				25				25			

Fonte: Autoria Própria (2021)

Após o encerramento dos ensaios, foi calculado o valor de condutividade hidráulica saturada de acordo com o método de uma altura de carga utilizando as Equações (9) e (10) e também de duas alturas de carga através da realização simultânea das Equações (11) e (12), utilizando as combinações de alturas de cargas de 5 e 10 cm, 5 e 15 cm e 10 e 15 cm. Para a obtenção dos resultados da condutividade hidráulica não saturada, foram utilizadas as Equações (13) e (14).

Vale ressaltar que os ensaios são idealizados para serem realizados em meses que possuem baixa precipitação, para que não ocorra nenhuma interferência nos resultados, desta foram, ocorreram nos meses de junho e julho, meses que tiveram precipitações baixas de chuva, como é possível visualizar no gráfico da Figura 20.

Figura 20 – Temperatura e precipitações médias no município de Apucarana



Fonte: CLIMATE-DATA.ORG (2022)

3.4 Ensaio de caracterização

Os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Apucarana. Ressalta-se que foram utilizadas amostras deformadas de solo armazenadas para tal finalidade, as quais foram coletadas no momento da abertura do furo de sondagem conforme descrito no item 3.3 do presente capítulo. As amostras deformadas de solo foram preparadas seguindo os procedimentos dispostos na NBR 6457:2016 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (ABNT, 2016).

O Quadro 4 apresenta os ensaios de caracterização propostos na presente pesquisa e das normas técnicas utilizadas em cada um desses ensaios seguindo as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Quadro 4 – Ensaio de caracterização e as respectivas normativas

Ensaio	Nº da normativa	Título da normativa
Limite de Liquidez	ABNT NBR 6459:2016	Solo – Determinação do limite de liquidez
Limite de Plasticidade	ABNT NBR 7180:2016	Solo – Determinação do limite de plasticidade
Análise Granulométrica Conjunta	ABNT NBR 7181:2016	Solo – Análise granulométrica

Fonte: Autoria Própria (2021)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização realizados em laboratório e os ensaios de permeabilidade efetuados no campo.

4.1 Ensaios de caracterização

Os resultados referentes aos ensaios de determinação do Limite de Liquidez e do Limite de Plasticidade, além do índice de plasticidade, estão apresentados na Tabela 6. Ressalta-se que essa tabela reúne os valores encontrados para as amostras de solo coletadas antes da realização dos ensaios de permeabilidade *in situ*, conforme descrito em 3.4.

Tabela 6 – Resultados de Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP) das amostras coletadas antes da realização dos ensaios de permeabilidade *in situ*

ID	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)
PG1a	57	37	20
PG1b	47	36	11
PG2a	56	37	19
PG2b	47	40	7
PG3a	44	33	11
PG3b	44	36	8
PG4a	49	38	11
PG4b	48	38	10
PG5a	65	47	18
PG5b	58	45	13
PG6a	44	39	5
PG6b	46	40	6
Média aritmética	50	39	12
Média geométrica	50	39	11

Fonte: Autoria Própria (2022)

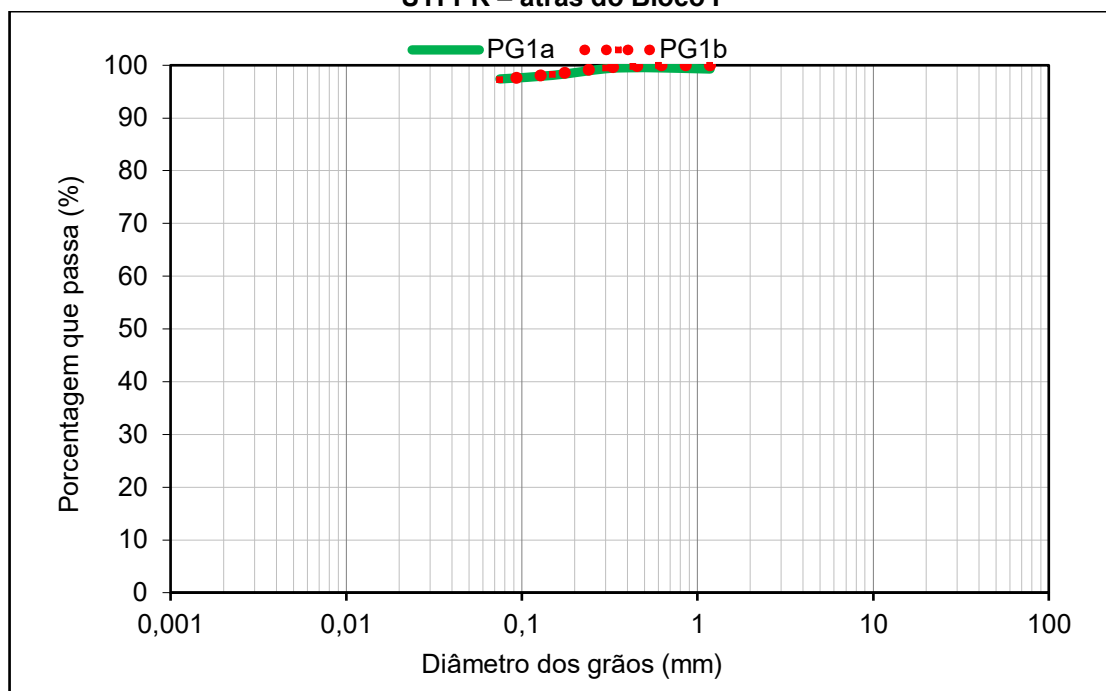
Observa-se na Tabela 7 que o Limite de Liquidez possui uma média de 50% e que os valores variaram entre 44% e 65%, sendo o menor valor encontrado para a

Praça da Mães (PG3a e PG3b) e Praça Semíramis Braga (PG6a), e o maior valor determinado para a Praça da Bíblia (PG5a). Já para o Limite de Plasticidade, a média é de 39% possível observar uma variação entre 33% e 47%, o menor valor foi encontrado na Praça das Mães (PG3b) enquanto o maior valor na Praça da Bíblia (PG5a). Por fim, o Índice de plasticidade apresentou uma média de 12% e teve uma variação entre 5% e 20%, o menor valor refere-se à Praça Semíramis Braga (PG6a) e o maior valor é referente a UTFPR – atrás do Bloco P.

Nota-se que trabalhos como de Oliveira (2021), Scomparim (2021) e Souza de Oliveira (2021) realizaram os mesmos ensaios com o solo do município de Apucarana. Oliveira (2021) encontrou valores de 46%, 34% e 12% para Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Índice de Plasticidade, respectivamente. Já Scomparim (2021) determinou valores de 50%, 42% e 8%. Enquanto que Souza de Oliveira (2021) encontram valores de 57%, 42% e 15%. Portanto, observa-se a semelhança dos resultados determinados na presente pesquisa com os valores expostos dos trabalhos supracitados, apresentando pequena variação.

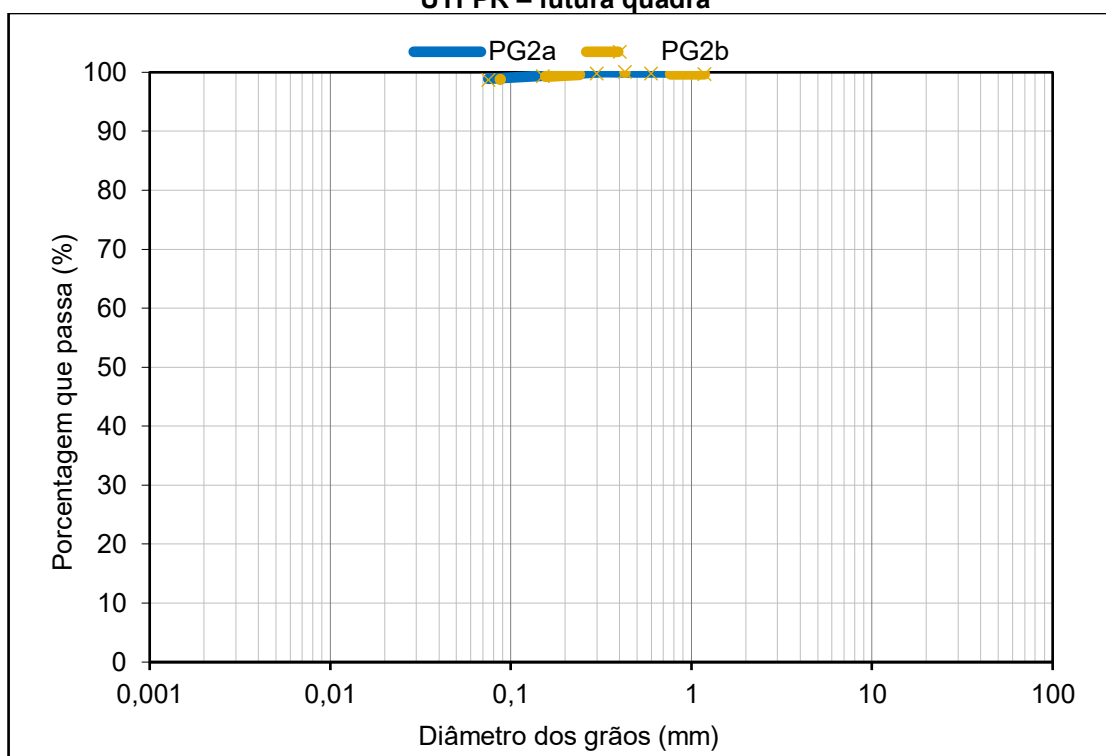
Os gráficos apresentados nas Figuras 21 a 26 apresentam os resultados dos ensaios de análise granulométrica conjunta, referentes apenas a etapa de peneiramento fino, expondo as porcentagens passantes em função do diâmetro dos grãos. Os resultados do ensaio de sedimentação para todas as localidades (PG1a ao PG6b) foram descartados por apresentarem valores de porcentagem passante superior à 100,0%. Acredita-se que esses resultados de sedimentação possam estar associados com a mistura (solo, água destilada e defloculante) não ter ficado totalmente homogênea antes de iniciar a primeira leitura no densímetro. Além disso, os ensaios não foram repetidos pelo fato de não haver quantidade de amostra de solo suficiente para refazê-los.

Figura 21 – Resultados do peneiramento fino realizados com a amostra retirada de solo da UTFPR – atrás do Bloco P



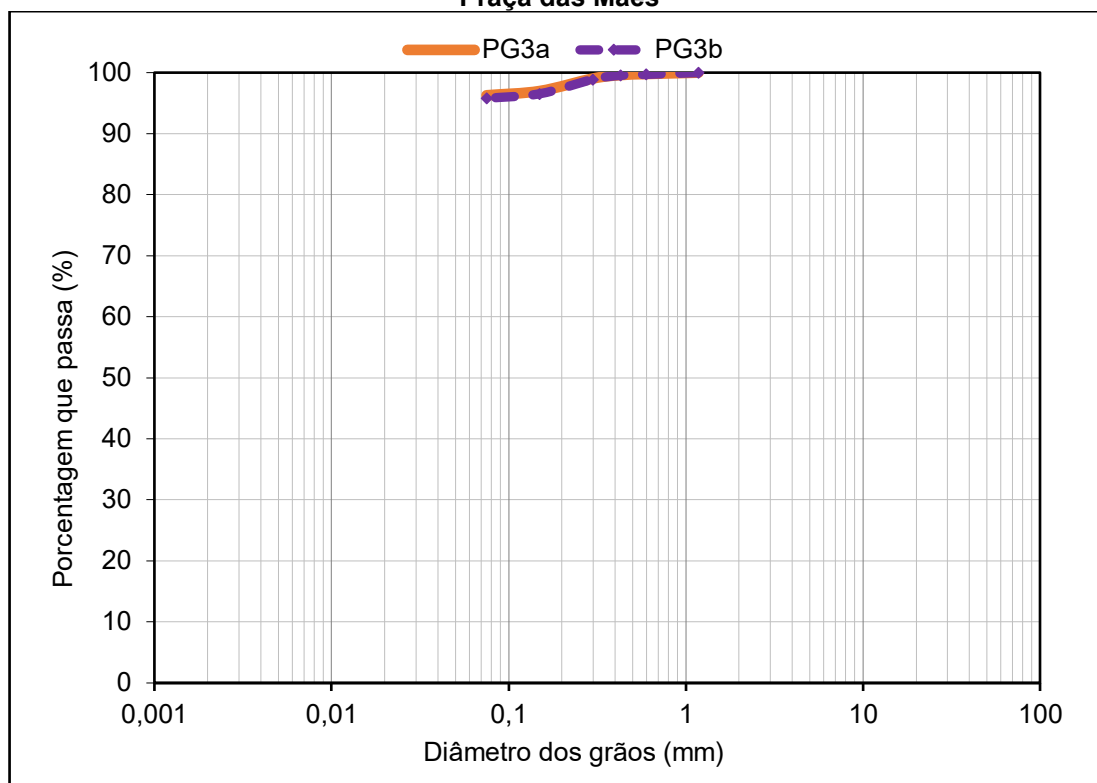
Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 22 – Resultados do peneiramento fino realizados com a amostra de solo retirada da UTFPR – futura quadra



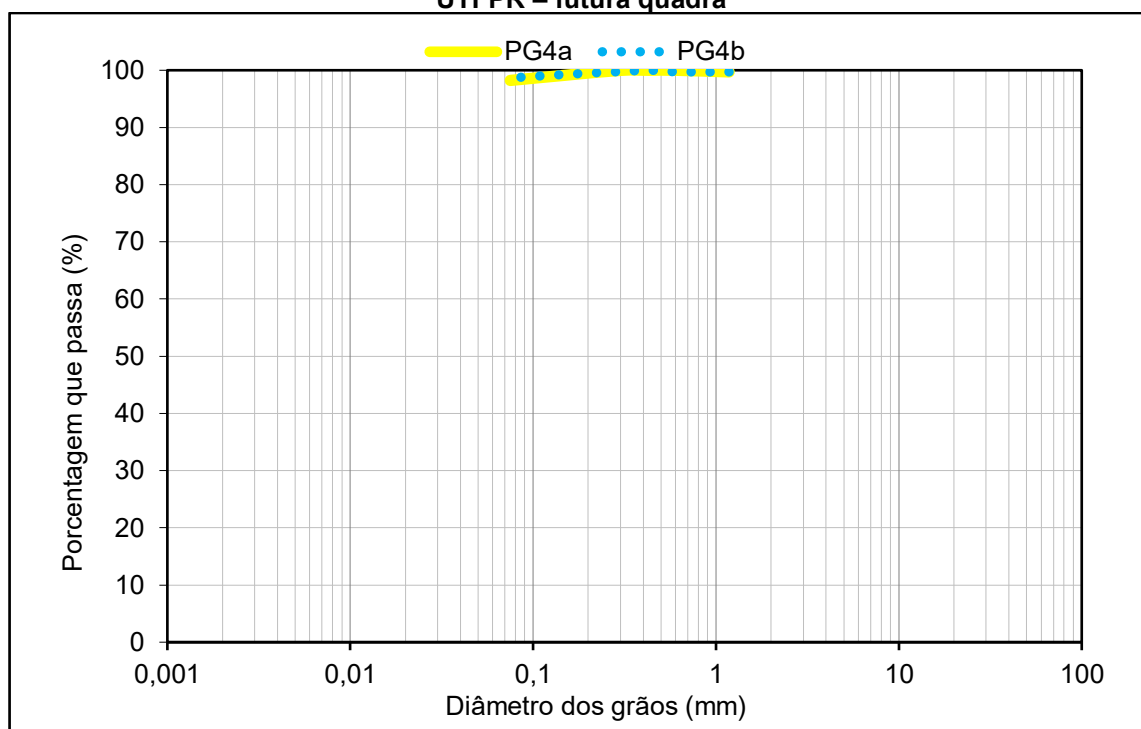
Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 23 – Resultados do peneiramento fino realizados com a amostra de solo retirada da Praça das Mães



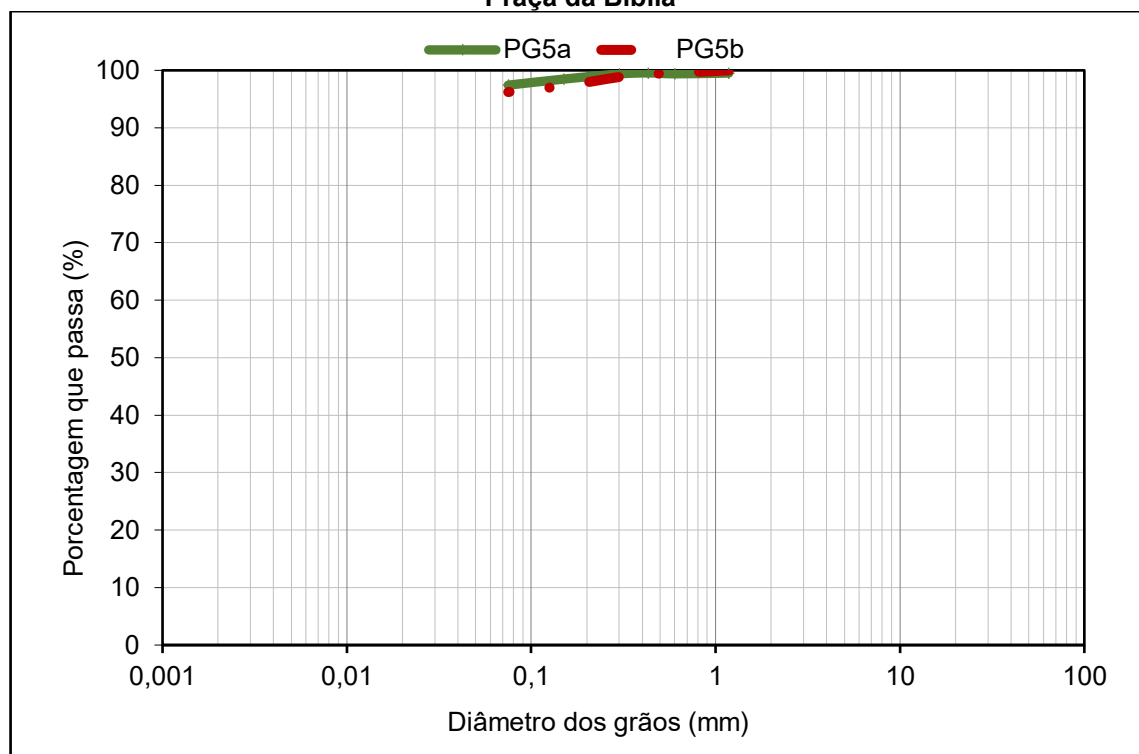
Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 24 – Resultados do peneiramento fino realizados com a amostra de solo retirada da UTFPR – futura quadra



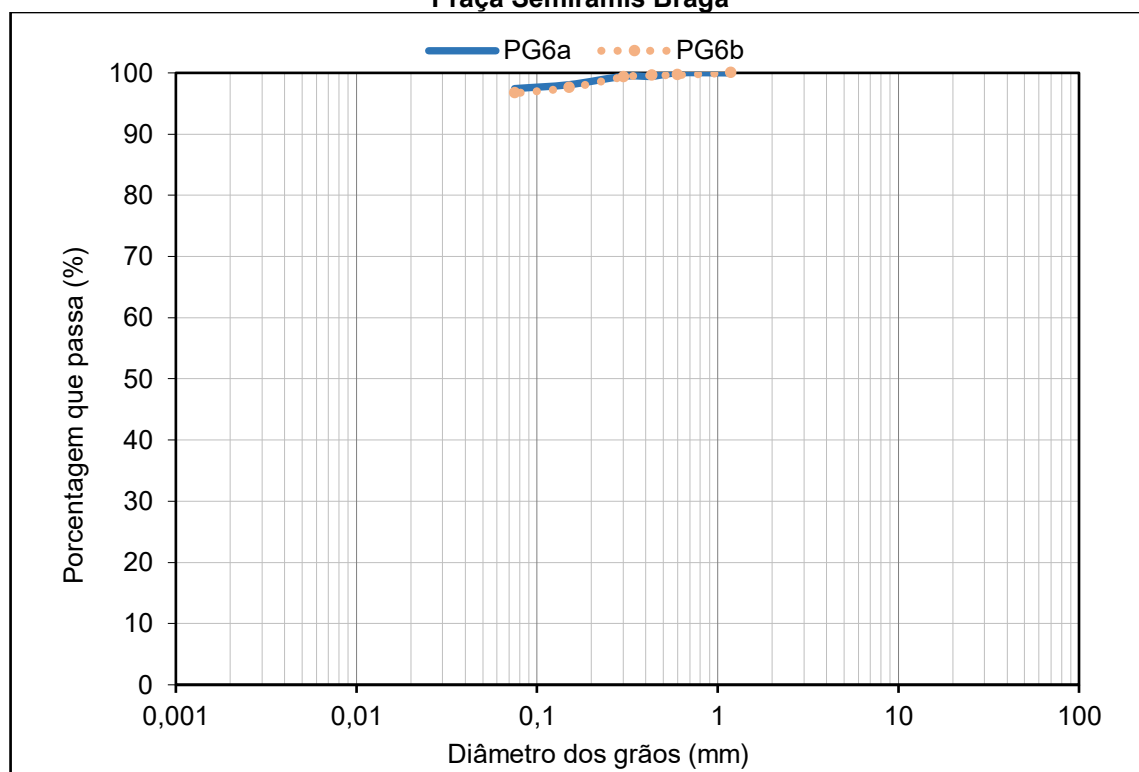
Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 25 – Resultados do peneiramento fino realizados com a amostra de solo retirada da Praça da Bíblia



Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 26 – Resultados do peneiramento fino realizados com a amostra de solo retirada da Praça Semíramis Braga



Fonte: Autoria Própria (2022)

Portanto, a partir dos resultados do ensaio de peneiramento fino foi possível construir a Tabela 7, na qual está reunida a porcentagem referente à granulometria de cada amostra de solo (PG1a ao PG6b). Vale ressaltar que devido aos valores do ensaio de sedimentação terem sido desconsiderados, a primeira coluna dos resultados contempla as partículas que possuem diâmetro inferior à 0,075 mm e que correspondem às partículas de argila, silte e uma pequena parcela de areia fina (0,075mm a 0,06 mm). Já a segunda coluna refere-se às partículas de areia fina para o intervalo de diâmetro de 0,075 mm a 0,2 mm devido ao fato do ensaio de peneiramento fino ter sido realizado até a peneira 200 (0,075mm). Portanto, por conta da limitação na determinação da dimensão das partículas no ensaio de peneiramento fino, a partícula de areia fina não foi considerada em todo seu intervalo de variação (0,06 a 0,2 mm), como descreve NBR 6502:1995 – Rochas e solos (ABNT, 1995).

Tabela 7 – Granulometria das partículas dos solos coletados dos furos para realização dos ensaios de permeabilidade

ID	Granulometria (%)				
	Partículas Finas $\phi \leq 0,075 \text{ mm}$	Areia Fina $0,075 \leq \phi \leq 0,2 \text{ mm}$	Areia Média $0,2 \leq \phi \leq 0,6 \text{ mm}$	Areia Grossa $0,6 \leq \phi \leq 2 \text{ mm}$	Pedregulho $\phi > 2 \text{ mm}$
PG1a	97,2	1,3	1,4	0,1	0
PG1b	97,3	1,0	1,7	0	0
PG2a	98,9	0,5	0,6	0	0
PG2b	98,7	0,6	0,7	0	0
PG3a	96,3	0,7	2,8	0,1	0
PG3b	95,8	0,7	3,2	0,3	0
PG4a	98,2	0,9	0,9	0	0
PG4b	98,7	0,6	0,7	0	0
PG5a	97,4	1,1	0,9	0,6	0
PG5b	96,2	0,9	2,2	0,5	0
PG6a	97,4	0,7	1,9	0	0
PG6b	96,7	0,9	2,1	0,3	0
Média Aritmética	97,4	0,8	1,6	0,2	0
Média Geométrica	97,4	0,8	1,4	0,3	0

Fonte: Autoria Própria (2022)

De acordo com a Tabela 7, nota-se que a média das partículas finas foi de 97,4% e que variaram de 95,8% a 98,9%, sendo o menor valor encontrado na Praça

das Mães (PG3b) e o maior na UTFPR – futura quadra (PG2a). Para a areia fina, a média foi de 0,8%, e teve uma variação de 0,5% a 1,3%, o menor valor corresponde a UTFPR – futura quadra (PG2a) e o maior, a UTFPR – atrás do Bloco P (PG1a). Já a média de areia média condisse a 1,6%, possuindo uma variação de 0,6% a 3,2%, correspondendo respectivamente a UTFPR – futura quadra (PG2a) e Praça das Mães (PG3b). Para a Areia Grossa, a média correspondeu a 0,2%, e em vários pontos não se obteve nenhuma porcentagem, como pode se observar na UTFPR – atrás do Bloco P (PG1b), UTFPR – futura quadra (PG2a e PG2b), UTFPR – futuro Bloco O (PG4a e PG4b) e Praça Semíramis Braga (PG6a), o maior valor corresponde a 0,6% e é encontrado na Praça da Bíblia (PG5a). Por fim, em nenhum ponto foi possível encontrar porcentagem de Pedregulho.

Constata-se que no trabalho de Oliveira (2021), Scomparim (2021) e Souza de Oliveira (2021) resultados referentes a esses mesmos ensaios de análise granulométrica conjunta realizados no município de Apucarana, porém, é válido dizer que todos esses trabalhos não tiveram problema e conseguiram concluir o ensaio de análise granulométrica conjunta. Oliveira (2021) encontrou valores de 65,5%; 28,5%; 3,5%; 2,3%; 0,2% para argila, silte, areia fina, areia média e areia grossa, respectivamente. Já Scomparim (2021) apresentou os valores de 74,1%; 17,1%; 5,5%; 3,3%; e 0% enquanto Souza de Oliveira (2021) encontrou os valores de 78,2%; 16,1%; 4,4%; 1,3% e 0%. Todos os trabalhos supracitados não encontraram nenhuma porcentagem de pedregulho. Em vista disso, observa-se semelhança com valores encontrados na presente pesquisa, havendo uma predominância de partículas finas (argila e silte).

4.2 Ensaio de permeabilidade

A Tabela 8 apresenta a identificação e a localização de cada ponto ensaiado assim como os valores referentes ao teor de umidade inicial (antes do início do ensaio) e final (após o término do ensaio) e sua respectiva variação devido o contato da água com o solo.

Tabela 8 – Teor de umidade inicial/final e a devida variação de cada ponto ensaiado

ID	Localização	Teor de umidade inicial w_i (%)	Teor de umidade final w_f (%)	Varição do teor de umidade Δw (%)
PG1a	UTFPR - atrás do Bloco P	39,1	51,6	12,5
PG1b		34,5	55,4	20,9
PG2a	UTFPR - futura quadra	45,3	59,0	13,7
PG2b		44,6	54,8	10,2
PG3a	Praça das Mães	41,0	60,8	19,8
PG3b		39,9	59,4	19,5
PG4a	UTFPR - futuro Bloco O	38,0	60,7	22,7
PG4b		40,3	65,4	25,1
PG5a	Praça da Bíblia	41,1	62,0	20,9
PG5b		39,6	59,9	20,3
PG6a	Praça Semíramis Braga	40,4	53,9	13,5
PG6b		37,9	63,3	25,4
Média aritmética		40,1	58,9	18,7
Média geométrica		40,1	58,7	18,0

Fonte: Autoria Própria (2021)

Como o ensaio de permeabilidade consiste em percolar água num determinado período de tempo no interior do furo de sondagem, espera-se que o teor de umidade sofra um acréscimo no seu valor, visto que é uma quantidade de água é infiltrada no solo para determinar a condutividade hidráulica saturada desse meio poroso. É importante mencionar que a variação no teor de umidade (Δw) depende do teor de umidade inicial do solo (w_i), e que também está diretamente associado com a época do ano em que os ensaios são realizados por conta da precipitação pluviométrica no local. De acordo com os valores apresentados na Tabela 9, percebeu-se que a variação do teor de umidade foi de 10,20% a 25,40% resultando numa média de 18,71%.

Já em relação ao tempo de cada ensaio, os mesmos encontram-se apresentados na Tabela 9. Destaca-se que cada um desses valores são referentes ao tempo total necessário para estabilização da infiltração, ou seja, do término de cada ensaio. A média de tempo dos ensaios para as cargas hidráulicas de 5, 10 e 15 cm, foram respectivamente de 14min40s; 14min20s e 13min00s. Dentre as três cargas hidráulicas utilizadas nos 12 ensaios, observa-se que apenas 5 ensaios excederam o tempo de 15 minutos para sua estabilização.

Tabela 9 – Tempo de ensaio de permeabilidade para as cargas hidráulicas de 5, 10 e 15 cm

ID	Tempo de ensaio (min)		
	H = 5cm	H = 10cm	H = 15 cm
PG1a	14	14	10
PG1b	16	24	16
PG2a	16	12	20
PG2b	14	20	12
PG3a	12	14	12
PG3b	12	10	12
PG4a	18	10	14
PG4b	20	14	10
PG5a	20	12	16
PG5b	10	16	14
PG6a	12	12	10
PG6b	12	14	10
Média aritmética	14min40s	14min20s	13min00s

Fonte: Autoria Própria (2021)

Os valores de condutividade hidráulica saturada de campo (k_{fs}) e potencial matricial de fluxo (Φ_{Gm}) foram calculados utilizando uma altura de carga a partir das Equações (9) e (10), estando apresentados os resultados na Tabela 10. Vale ressaltar que foi adotado o valor de 0,04 para o parâmetro α indicado na Tabela 3 devido o solo ensaiado possuírem as mesmas características: solos de textura fina, principalmente sem macroporos e fissuras.

Tabela 10 – Determinação dos parâmetros k_{fs} e Φ_{Gm} a partir de ensaios com o Permeâmetro Guelph utilizando o método de uma altura de carga

(continua)

ID	Condutividade hidráulica saturada de campo k_{fs} (cm/s)			Potencial matricial de fluxo Φ_{Gm} (cm ² /s)		
	H = 5 cm	H = 10 cm	H = 15 cm	H = 5 cm	H = 10 cm	H = 15 cm
	PG1a	$1,28 \cdot 10^{-4}$	$5,08 \cdot 10^{-5}$	$2,51 \cdot 10^{-5}$	$5,33 \cdot 10^{-5}$	$2,12 \cdot 10^{-5}$
PG1b	$2,81 \cdot 10^{-4}$	$2,96 \cdot 10^{-4}$	$2,26 \cdot 10^{-4}$	$1,17 \cdot 10^{-4}$	$1,24 \cdot 10^{-4}$	$9,40 \cdot 10^{-5}$
PG2a	$4,71 \cdot 10^{-6}$	$3,12 \cdot 10^{-6}$	$3,07 \cdot 10^{-6}$	$1,96 \cdot 10^{-6}$	$1,30 \cdot 10^{-6}$	$1,28 \cdot 10^{-6}$
PG2b	$3,14 \cdot 10^{-6}$	$1,56 \cdot 10^{-6}$	$2,31 \cdot 10^{-6}$	$1,31 \cdot 10^{-6}$	$6,49 \cdot 10^{-7}$	$9,61 \cdot 10^{-7}$
PG3a	$9,41 \cdot 10^{-6}$	$1,04 \cdot 10^{-5}$	$1,15 \cdot 10^{-5}$	$3,92 \cdot 10^{-6}$	$4,33 \cdot 10^{-6}$	$4,80 \cdot 10^{-6}$
PG3b	$1,57 \cdot 10^{-5}$	$1,25 \cdot 10^{-5}$	$1,23 \cdot 10^{-5}$	$6,54 \cdot 10^{-4}$	$5,19 \cdot 10^{-4}$	$5,12 \cdot 10^{-4}$

Tabela 10 – Determinação dos parâmetros k_{fs} e Φ_{Gm} a partir de ensaios com o Permeâmetro Guelph utilizando o método de uma altura de carga

(conclusão)

ID	Condutividade hidráulica saturada de campo k_{fs} (cm/s)			Potencial matricial de fluxo Φ_{Gm} (cm ² /s)		
	H = 5 cm	H = 10 cm	H = 15 cm	H = 5 cm	H = 10 cm	H = 15 cm
	PG4a	$7,84 \cdot 10^{-7}$	$1,04 \cdot 10^{-6}$	$1,54 \cdot 10^{-6}$	$3,27 \cdot 10^{-7}$	$4,33 \cdot 10^{-7}$
PG4b	$7,84 \cdot 10^{-7}$	$1,04 \cdot 10^{-6}$	$7,68 \cdot 10^{-7}$	$3,27 \cdot 10^{-7}$	$4,33 \cdot 10^{-7}$	$3,20 \cdot 10^{-7}$
PG5a	$7,84 \cdot 10^{-7}$	$1,04 \cdot 10^{-6}$	$7,68 \cdot 10^{-7}$	$3,27 \cdot 10^{-7}$	$4,33 \cdot 10^{-7}$	$3,20 \cdot 10^{-7}$
PG5b	$3,14 \cdot 10^{-6}$	$1,56 \cdot 10^{-6}$	$1,54 \cdot 10^{-6}$	$1,31 \cdot 10^{-6}$	$6,49 \cdot 10^{-7}$	$6,40 \cdot 10^{-7}$
PG6a	$2,35 \cdot 10^{-5}$	$3,12 \cdot 10^{-5}$	$2,46 \cdot 10^{-5}$	$9,80 \cdot 10^{-4}$	$1,30 \cdot 10^{-5}$	$1,02 \cdot 10^{-5}$
PG6b	$1,57 \cdot 10^{-5}$	$2,08 \cdot 10^{-5}$	$1,61 \cdot 10^{-5}$	$6,54 \cdot 10^{-6}$	$8,66 \cdot 10^{-6}$	$6,72 \cdot 10^{-6}$
Média aritmética	$4,06 \cdot 10^{-5}$	$3,60 \cdot 10^{-5}$	$2,71 \cdot 10^{-5}$	$1,69 \cdot 10^{-5}$	$8,66 \cdot 10^{-5}$	$1,13 \cdot 10^{-5}$
Média geométrica	$7,71 \cdot 10^{-6}$	$6,85 \cdot 10^{-6}$	$6,19 \cdot 10^{-6}$	$3,21 \cdot 10^{-6}$	$2,86 \cdot 10^{-6}$	$2,58 \cdot 10^{-6}$

Fonte: Autoria Própria (2022)

A média da grandeza dos valores da condutividade hidráulica saturada e do potencial matricial estão respectivamente na ordem de 10^{-5} cm/s e 10^{-5} cm²/s.

A Tabela 11 apresenta os resultados da condutividade hidráulica saturada de campo (k_{fs}) e do potencial matricial de fluxo (Φ_{Gm}) utilizando o método de duas alturas de carga, ao quais são representadas pelas resolução simultânea das Equações (11) e (12).

Tabela 11 – Determinação dos parâmetros k_{fs} e Φ_{Gm} a partir de ensaios com o Permeâmetro Guelph utilizando o método de duas alturas de carga

(continua)

ID	Condutividade hidráulica saturada de campo k_{fs} (cm/s)			Potencial matricial de fluxo Φ_{Gm} (cm ² /s)		
	H = 5 cm e 10 cm	H = 5 cm e 15 cm	H = 10 cm e 15 cm	H = 5 cm e 10 cm	H = 5 cm e 15 cm	H = 10 cm e 15 cm
	PG1a	N/A	N/A	N/A	$1,08 \cdot 10^{-4}$	$9,43 \cdot 10^{-5}$
PG1b	$3,93 \cdot 10^{-4}$	$4,92 \cdot 10^{-5}$	N/A	$1,07 \cdot 10^{-4}$	$1,40 \cdot 10^{-4}$	$2,27 \cdot 10^{-4}$
PG2a	N/A	N/A	$2,76 \cdot 10^{-6}$	$3,09 \cdot 10^{-6}$	$2,61 \cdot 10^{-6}$	$1,36 \cdot 10^{-6}$
PG2b	N/A	N/A	$7,72 \cdot 10^{-6}$	$2,43 \cdot 10^{-6}$	$1,64 \cdot 10^{-6}$	N/A
PG3a	$1,66 \cdot 10^{-5}$	$1,82 \cdot 10^{-5}$	$1,98 \cdot 10^{-5}$	$3,23 \cdot 10^{-6}$	$3,08 \cdot 10^{-6}$	$2,67 \cdot 10^{-6}$

Tabela 11 – Determinação dos parâmetros k_{fs} e Φ_{Gm} a partir de ensaios com o Permeâmetro Guelph utilizando o método de duas alturas de carga

(conclusão)

ID	Condutividade hidráulica saturada de campo			Potencial matricial de fluxo Φ_{Gm} (cm ² /s)		
	k_{fs} (cm/s)					
	H = 5 e 10 cm	H = 5 e 15 cm	H = 10 e 15 cm	H = 5 e 10 cm	H = 5 e 15 cm	H = 10 e 15 cm
PG3b	N/A	1,58.10 ⁻⁶	1,11.10 ⁻⁵	8,82.10 ⁻⁶	7,89.10 ⁻⁶	5,44.10 ⁻⁶
PG4a	2,66.10 ⁻⁶	3,92.10 ⁻⁶	5,15.10 ⁻⁶	1,47.10 ⁻⁷	2,63.10 ⁻⁸	N/A
PG4b	2,66.10 ⁻⁶	7,18.10 ⁻⁷	N/A	1,47.10 ⁻⁷	3,33.10 ⁻⁷	8,26.10 ⁻⁷
PG5a	2,66.10 ⁻⁶	7,18.10 ⁻⁷	N/A	1,47.10 ⁻⁷	3,33.10 ⁻⁷	8,26.10 ⁻⁷
PG5b	N/A	N/A	1,38.10 ⁻⁶	2,43.10 ⁻⁶	1,95.10 ⁻⁶	6,80.10 ⁻⁷
PG6a	7,99.10 ⁻⁵	2,79.10 ⁻⁵	N/A	4,40.10 ⁻⁶	9,38.10 ⁻⁶	2,25.10 ⁻⁵
PG6b	5,32.10 ⁻⁵	1,76.10 ⁻⁵	N/A	2,93.10 ⁻⁶	6,36.10 ⁻⁶	1,54.10 ⁻⁵
Média aritmética	7,86.10 ⁻⁵	1,50.10 ⁻⁵	7,98.10 ⁻⁶	2,02.10 ⁻⁵	2,23.10 ⁻⁵	3,35.10 ⁻⁵
Média geométrica	1,76.10 ⁻⁵	5,86.10 ⁻⁶	5,67.10 ⁻⁶	2,80.10 ⁻⁶	2,96.10 ⁻⁶	5,79.10 ⁻⁶

Fonte: Autoria Própria (2022)

Os campos preenchidos na Tabela 11 com N/A representam a abreviação de “Não Aplicável” pois corresponde à valores negativos e que não são condizentes com os resultados esperados para a permeabilidade. Assim como os resultados utilizando o método de uma altura de carga, a média dos resultados do método de duas alturas de cargas também encontram-se na ordem de 10⁻⁵ e 10⁻⁶ cm/s tanto para condutividade hidráulica saturada de campo quanto para potencial matricial de fluxo.

Com base na ordem de grandeza dos resultados da condutividade hidráulica saturada para o método de uma altura de carga tanto para o método de duas alturas de carga, é possível classificar o grau de permeabilidade de acordo com as considerações de Terzaghi e Peck (1967 *apud* SANTOS, 2005) como muito baixo e classificar o tipo do solo segundo Mello e Teixeira (1967 *apud* SANTOS, 2005) como areias finas siltosas e argilosas e também siltes argilosos.

A partir dos resultados das Tabelas 10 e 11 é possível fazer uma estimativa do parâmetro α utilizando a Equação (13), os quais encontram-se apresentados na Tabela 12. De acordo com SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP. (2009), sugere-se que o parâmetro α sofra uma variação de 0,01 cm⁻¹ a 0,50 cm⁻¹ por isso, para aqueles

valores que não estiverem nessa faixa, será adotado o parâmetro α sugerido pela Tabela 2.

Tabela 12 – Determinação do parâmetro α – método de uma altura de carga e duas alturas de α

ID	Parâmetro α					
	Método de uma altura de carga			Método de duas alturas de cargas		
	5 cm	10 cm	15 cm	5 e 10 cm	5 e 15 cm	10 e 15 cm
PG1a	2,40	2,40	2,40	N/A	N/A	N/A
PG1b	2,40	2,40	2,40	3,69	$3,53 \cdot 10^{-1}$	N/A
PG2a	2,40	2,40	2,40	N/A	N/A	2,03
PG2b	2,40	2,40	2,40	N/A	N/A	N/A
PG3a	2,40	2,40	2,40	5,15	5,92	7,40
PG3b	2,40	2,40	2,40	N/A	$2,00 \cdot 10^{-1}$	2,03
PG4a	2,40	2,40	2,40	$1,82 \cdot 10$	$1,49 \cdot 10^2$	N/A
PG4b	2,40	2,40	2,40	$1,82 \cdot 10$	2,16	N/A
PG5a	2,40	2,40	2,40	$1,82 \cdot 10$	2,16	N/A
PG5b	2,40	2,40	2,40	N/A	N/A	2,03
PG6a	2,40	2,40	2,40	$1,82 \cdot 10$	2,98	N/A
PG6b	2,40	2,40	2,40	$1,82 \cdot 10$	2,76	N/A
Média aritmética	2,40	2,40	2,40	$1,42 \cdot 10$	$2,07 \cdot 10$	3,37
Média geométrica	2,40	2,40	2,40	$1,21 \cdot 10$	2,64	2,81

Fonte: Autoria Própria (2022)

Notoriamente é perceptível que os resultados encontrados do parâmetro α não estão na faixa indicada pelo manual do equipamento, conforme indica SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP. (2009), sendo assim, admitiu-se o valor de 0,04 para aqueles valores que não estavam nesse intervalo.

Para a estimativa da condutividade hidráulica não saturada foi utilizada a equação de Gardner (1958), representada pela Equação (14). Ressalta-se que a pesquisa realizada por Fernandes e Augusto Filho (2015), apontaram que o monitoramento da sucção em campo por meio da instalação de tensiômetros resultaram em uma sucção matricial de 60 a 70 kPa. Por esse motivo, foi atribuído o valor de 100 kPa como valor limite da sucção matricial para a estimativa da condutividade hidráulica não saturada. As Tabelas 13 a 15 apresentam os resultados para a condutividade hidráulica não saturada utilizando valores encontrados pelo método de uma altura de carga.

Tabela 13 – Condutividade hidráulica não saturada $k(\phi)$ ou $k(\psi)$ utilizando os valores fornecidos pelo método de uma altura de carga com H correspondendo a 5 cm

H = 5 cm				
ID	Condutividade hidráulica não saturada (cm/s)			
	$\psi_m = 0,0981 \text{ kPa}$	$\psi_m = 0,981 \text{ kPa}$	$\psi_m = 9,81 \text{ kPa}$	$\psi_m = 98,1 \text{ kPa}$
PG1a	$1,23 \cdot 10^{-4}$	$8,57 \cdot 10^{-5}$	$2,34 \cdot 10^{-6}$	$5,43 \cdot 10^{-22}$
PG1b	$2,70 \cdot 10^{-4}$	$1,89 \cdot 10^{-4}$	$5,15 \cdot 10^{-6}$	$1,20 \cdot 10^{-21}$
PG2a	$4,52 \cdot 10^{-6}$	$3,15 \cdot 10^{-6}$	$8,62 \cdot 10^{-8}$	$2,00 \cdot 10^{-23}$
PG2b	$3,01 \cdot 10^{-6}$	$2,10 \cdot 10^{-6}$	$5,75 \cdot 10^{-8}$	$1,33 \cdot 10^{-23}$
PG3a	$9,04 \cdot 10^{-6}$	$6,31 \cdot 10^{-6}$	$1,72 \cdot 10^{-7}$	$4,00 \cdot 10^{-23}$
PG3b	$1,51 \cdot 10^{-5}$	$1,05 \cdot 10^{-5}$	$2,87 \cdot 10^{-7}$	$6,66 \cdot 10^{-23}$
PG4a	$7,54 \cdot 10^{-7}$	$5,26 \cdot 10^{-7}$	$1,44 \cdot 10^{-8}$	$3,33 \cdot 10^{-24}$
PG4b	$7,54 \cdot 10^{-7}$	$5,26 \cdot 10^{-7}$	$1,44 \cdot 10^{-8}$	$3,33 \cdot 10^{-24}$
PG5a	$7,54 \cdot 10^{-7}$	$5,26 \cdot 10^{-7}$	$1,44 \cdot 10^{-8}$	$3,33 \cdot 10^{-24}$
PG5b	$3,01 \cdot 10^{-6}$	$2,10 \cdot 10^{-6}$	$5,75 \cdot 10^{-8}$	$1,33 \cdot 10^{-23}$
PG6a	$2,26 \cdot 10^{-5}$	$1,58 \cdot 10^{-5}$	$4,31 \cdot 10^{-7}$	$1,00 \cdot 10^{-22}$
PG6b	$1,51 \cdot 10^{-5}$	$1,05 \cdot 10^{-5}$	$2,87 \cdot 10^{-7}$	$6,66 \cdot 10^{-23}$
Média Aritmética	$3,90 \cdot 10^{-5}$	$2,72 \cdot 10^{-5}$	$7,43 \cdot 10^{-7}$	$1,72 \cdot 10^{-22}$
Média Geométrica	$7,40 \cdot 10^{-6}$	$5,17 \cdot 10^{-6}$	$1,41 \cdot 10^{-7}$	$3,27 \cdot 10^{-23}$

Fonte: Autoria Própria (2022)

Tabela 14 – Condutividade hidráulica não saturada $k(\phi)$ ou $k(\psi)$ utilizando os valores fornecidos pelo método de uma altura de carga com H correspondendo a 10 cm

(continua)

H = 10 cm				
ID	Condutividade hidráulica não saturada (cm/s)			
	$\psi_m = 0,0981 \text{ kPa}$	$\psi_m = 0,981 \text{ kPa}$	$\psi_m = 9,81 \text{ kPa}$	$\psi_m = 98,1 \text{ kPa}$
PG1a	$4,88 \cdot 10^{-5}$	$3,41 \cdot 10^{-5}$	$9,31 \cdot 10^{-7}$	$2,16 \cdot 10^{-22}$
PG1b	$2,85 \cdot 10^{-4}$	$1,99 \cdot 10^{-4}$	$5,43 \cdot 10^{-6}$	$1,26 \cdot 10^{-21}$
PG2a	$2,99 \cdot 10^{-6}$	$2,09 \cdot 10^{-6}$	$5,71 \cdot 10^{-8}$	$1,32 \cdot 10^{-23}$
PG2b	$1,50 \cdot 10^{-6}$	$1,04 \cdot 10^{-6}$	$2,85 \cdot 10^{-8}$	$6,62 \cdot 10^{-24}$
PG3a	$9,98 \cdot 10^{-6}$	$6,96 \cdot 10^{-6}$	$1,90 \cdot 10^{-7}$	$4,41 \cdot 10^{-23}$
PG3b	$1,20 \cdot 10^{-5}$	$8,36 \cdot 10^{-6}$	$2,28 \cdot 10^{-7}$	$5,30 \cdot 10^{-23}$
PG4a	$9,98 \cdot 10^{-7}$	$6,96 \cdot 10^{-7}$	$1,90 \cdot 10^{-8}$	$4,41 \cdot 10^{-24}$
PG4b	$9,98 \cdot 10^{-7}$	$6,96 \cdot 10^{-7}$	$1,90 \cdot 10^{-8}$	$4,41 \cdot 10^{-24}$
PG5a	$9,98 \cdot 10^{-7}$	$6,96 \cdot 10^{-7}$	$1,90 \cdot 10^{-8}$	$4,41 \cdot 10^{-24}$
PG5b	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$1,04 \cdot 10^{-6}$	$2,85 \cdot 10^{-8}$	$6,62 \cdot 10^{-24}$
PG6a	$2,99 \cdot 10^{-7}$	$2,09 \cdot 10^{-5}$	$5,71 \cdot 10^{-7}$	$1,32 \cdot 10^{-22}$
PG6b	$2,00 \cdot 10^{-7}$	$1,39 \cdot 10^{-5}$	$3,81 \cdot 10^{-7}$	$8,83 \cdot 10^{-23}$

Tabela 14 – Condutividade hidráulica não saturada $k(\phi)$ ou $k(\psi)$ utilizando os valores fornecidos pelo método de uma altura de carga com H correspondendo a 10 cm (conclusão)

H = 10 cm				
ID	Condutividade hidráulica não saturada (cm/s)			
	$\psi_m = 0,0981 \text{ kPa}$	$\psi_m = 0,981 \text{ kPa}$	$\psi_m = 9,81 \text{ kPa}$	$\psi_m = 98,1 \text{ kPa}$
Média Aritmética	$3,45 \cdot 10^{-5}$	$2,41 \cdot 10^{-5}$	$6,58 \cdot 10^{-7}$	$1,53 \cdot 10^{-22}$
Média Geométrica	$6,58 \cdot 10^{-6}$	$4,59 \cdot 10^{-6}$	$1,26 \cdot 10^{-7}$	$2,91 \cdot 10^{-23}$

Fonte: Aatoria Própria (2022)

Tabela 15 – Condutividade hidráulica não saturada $k(\phi)$ ou $k(\psi)$ utilizando os valores fornecidos pelo método de uma altura de carga com H correspondendo a 15 cm

H = 15 cm				
ID	Condutividade hidráulica não saturada (cm/s)			
	$\psi_m = 0,0981 \text{ kPa}$	$\psi_m = 0,981 \text{ kPa}$	$\psi_m = 9,81 \text{ kPa}$	$\psi_m = 98,1 \text{ kPa}$
PG1a	$2,41 \cdot 10^{-5}$	$1,68 \cdot 10^{-5}$	$4,59 \cdot 10^{-7}$	$1,06 \cdot 10^{-22}$
PG1b	$2,17 \cdot 10^{-4}$	$1,51 \cdot 10^{-4}$	$4,13 \cdot 10^{-6}$	$9,58 \cdot 10^{-22}$
PG2a	$2,95 \cdot 10^{-6}$	$2,06 \cdot 10^{-6}$	$5,63 \cdot 10^{-8}$	$1,31 \cdot 10^{-23}$
PG2b	$2,22 \cdot 10^{-6}$	$1,55 \cdot 10^{-6}$	$4,22 \cdot 10^{-8}$	$9,79 \cdot 10^{-24}$
PG3a	$1,11 \cdot 10^{-5}$	$7,73 \cdot 10^{-6}$	$2,11 \cdot 10^{-7}$	$4,90 \cdot 10^{-23}$
PG3b	$1,18 \cdot 10^{-5}$	$8,24 \cdot 10^{-6}$	$2,25 \cdot 10^{-7}$	$5,22 \cdot 10^{-23}$
PG4a	$1,48 \cdot 10^{-6}$	$1,03 \cdot 10^{-6}$	$2,82 \cdot 10^{-8}$	$6,53 \cdot 10^{-24}$
PG4b	$7,38 \cdot 10^{-7}$	$5,15 \cdot 10^{-7}$	$1,41 \cdot 10^{-8}$	$3,26 \cdot 10^{-24}$
PG5a	$7,38 \cdot 10^{-7}$	$5,15 \cdot 10^{-7}$	$1,41 \cdot 10^{-8}$	$3,26 \cdot 10^{-24}$
PG5b	$1,48 \cdot 10^{-6}$	$1,03 \cdot 10^{-6}$	$2,82 \cdot 10^{-8}$	$6,53 \cdot 10^{-24}$
PG6a	$2,36 \cdot 10^{-5}$	$1,65 \cdot 10^{-5}$	$4,50 \cdot 10^{-7}$	$1,04 \cdot 10^{-22}$
PG6b	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$1,08 \cdot 10^{-5}$	$2,96 \cdot 10^{-7}$	$6,86 \cdot 10^{-23}$
Média Aritmética	$2,60 \cdot 10^{-5}$	$1,82 \cdot 10^{-5}$	$4,96 \cdot 10^{-7}$	$1,15 \cdot 10^{-22}$
Média Geométrica	$5,94 \cdot 10^{-6}$	$4,15 \cdot 10^{-6}$	$1,13 \cdot 10^{-7}$	$2,63 \cdot 10^{-23}$

Fonte: Aatoria Própria (2022)

As Tabelas 16 a 18 apresentam os resultados para a condutividade hidráulica não saturada utilizando valores encontrados pelo método de duas alturas de carga, 5 e 10 cm, 5 e 15 cm e 10 e 15 cm, respectivamente.

Tabela 16 – Condutividade hidráulica não saturada $k(\phi)$ ou $k(\psi)$ utilizando os valores fornecidos pelo método de duas alturas de carga com H correspondendo a 5 cm e 10 cm

H = 5 e 10 cm				
ID	Condutividade hidráulica não saturada (cm/s)			
	$\psi_m = 0,0981 \text{ kPa}$	$\psi_m = 0,981 \text{ kPa}$	$\psi_m = 9,81 \text{ kPa}$	$\psi_m = 98,1 \text{ kPa}$
PG1a	N/A	N/A	N/A	N/A
PG1b	$3,78 \cdot 10^{-4}$	$2,63 \cdot 10^{-4}$	$7,20 \cdot 10^{-6}$	$1,67 \cdot 10^{-21}$
PG2a	N/A	N/A	N/A	N/A
PG2b	N/A	N/A	N/A	N/A
PG3a	$1,59 \cdot 10^{-5}$	$1,11 \cdot 10^{-5}$	$3,04 \cdot 10^{-7}$	$7,05 \cdot 10^{-23}$
PG3b	N/A	N/A	N/A	N/A
PG4a	$2,56 \cdot 10^{-6}$	$1,78 \cdot 10^{-6}$	$4,87 \cdot 10^{-8}$	$1,13 \cdot 10^{-23}$
PG4b	$2,56 \cdot 10^{-6}$	$1,78 \cdot 10^{-6}$	$4,87 \cdot 10^{-8}$	$1,13 \cdot 10^{-23}$
PG5a	$2,56 \cdot 10^{-6}$	$1,78 \cdot 10^{-6}$	$4,87 \cdot 10^{-8}$	$1,13 \cdot 10^{-23}$
PG5b	N/A	N/A	N/A	N/A
PG6a	$7,68 \cdot 10^{-5}$	$5,36 \cdot 10^{-5}$	$1,46 \cdot 10^{-6}$	$3,39 \cdot 10^{-22}$
PG6b	$5,11 \cdot 10^{-5}$	$3,57 \cdot 10^{-5}$	$9,74 \cdot 10^{-7}$	$2,26 \cdot 10^{-22}$
Média Aritmética	$7,56 \cdot 10^{-5}$	$5,27 \cdot 10^{-5}$	$1,44 \cdot 10^{-6}$	$3,34 \cdot 10^{-22}$
Média Geométrica	$1,69 \cdot 10^{-5}$	$1,18 \cdot 10^{-5}$	$3,22 \cdot 10^{-7}$	$7,47 \cdot 10^{-23}$

Fonte: Autoria Própria (2022)

Tabela 17 – Condutividade hidráulica não saturada $k(\phi)$ ou $k(\psi)$ utilizando os valores fornecidos pelo método de duas alturas de carga com H correspondendo a 5 cm e 15 cm (continua)

H = 5 e 15 cm				
ID	Condutividade hidráulica não saturada (cm/s)			
	$\psi_m = 0,0981 \text{ kPa}$	$\psi_m = 0,981 \text{ kPa}$	$\psi_m = 9,81 \text{ kPa}$	$\psi_m = 98,1 \text{ kPa}$
PG1a	N/A	N/A	N/A	N/A
PG1b	$3,47 \cdot 10^{-5}$	$1,49 \cdot 10^{-6}$	$3,10 \cdot 10^{-20}$	$4,89 \cdot 10^{-157}$
PG2a	N/A	N/A	N/A	N/A
PG2b	N/A	N/A	N/A	N/A
PG3a	$1,75 \cdot 10^{-5}$	$1,22 \cdot 10^{-5}$	$3,33 \cdot 10^{-7}$	$7,73 \cdot 10^{-23}$
PG3b	$1,29 \cdot 10^{-6}$	$2,14 \cdot 10^{-7}$	$3,26 \cdot 10^{-15}$	$2,19 \cdot 10^{-93}$
PG4a	$3,77 \cdot 10^{-6}$	$2,63 \cdot 10^{-6}$	$7,18 \cdot 10^{-8}$	$1,67 \cdot 10^{-23}$
PG4b	$6,90 \cdot 10^{-7}$	$4,81 \cdot 10^{-7}$	$1,32 \cdot 10^{-8}$	$3,05 \cdot 10^{-24}$
PG5a	$6,90 \cdot 10^{-7}$	$4,81 \cdot 10^{-7}$	$1,32 \cdot 10^{-8}$	$3,05 \cdot 10^{-24}$
PG5b	N/A	N/A	N/A	N/A
PG6a	$2,68 \cdot 10^{-5}$	$1,87 \cdot 10^{-5}$	$5,11 \cdot 10^{-7}$	$1,19 \cdot 10^{-22}$
PG6b	$1,69 \cdot 10^{-5}$	$1,18 \cdot 10^{-5}$	$3,22 \cdot 10^{-7}$	$7,48 \cdot 10^{-23}$

Tabela 17 – Condutividade hidráulica não saturada $k(\phi)$ ou $k(\psi)$ utilizando os valores fornecidos pelo método de duas alturas de carga com H correspondendo a 5 cm e 15 cm (conclusão)

ID	H = 5 e 15 cm			
	Condutividade hidráulica não saturada (cm/s)			
	$\psi_m = 0,0981 \text{ kPa}$	$\psi_m = 0,981 \text{ kPa}$	$\psi_m = 9,81 \text{ kPa}$	$\psi_m = 98,1 \text{ kPa}$
Média Aritmética	$1,28 \cdot 10^{-5}$	$6,00 \cdot 10^{-6}$	$1,58 \cdot 10^{-7}$	$3,67 \cdot 10^{-23}$
Média Geométrica	$5,32 \cdot 10^{-6}$	$2,19 \cdot 10^{-6}$	$3,02 \cdot 10^{-10}$	$7,62 \cdot 10^{-49}$

Fonte: Autoria Própria (2022)

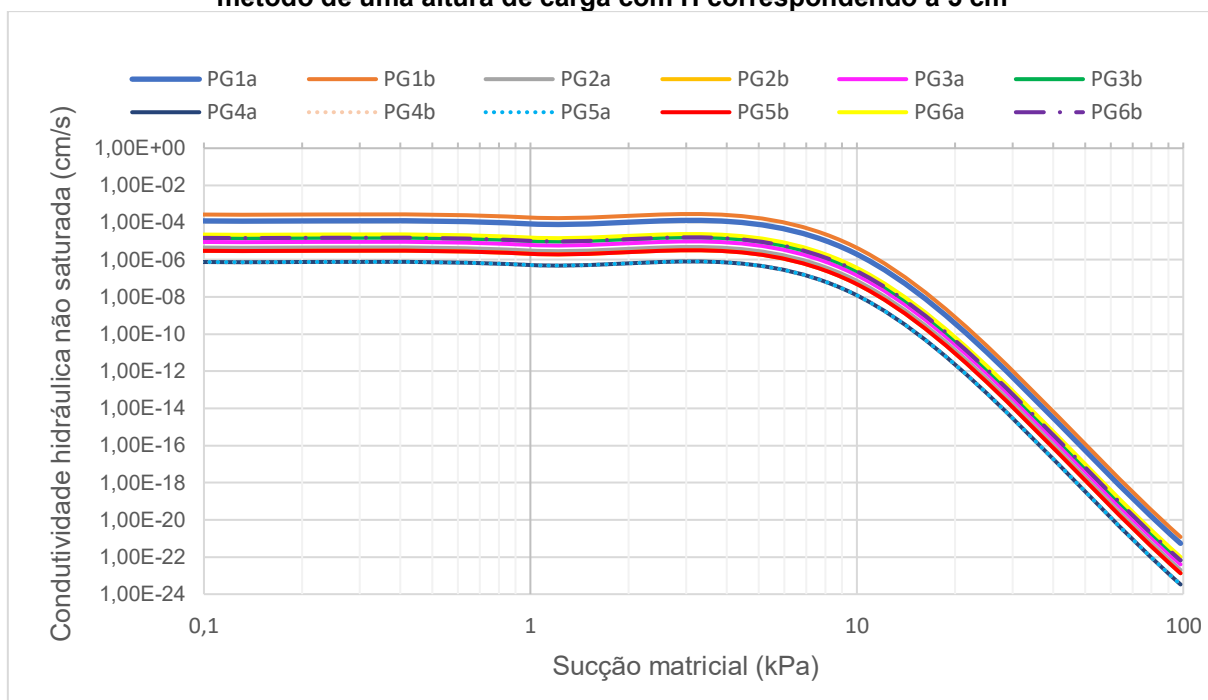
Tabela 18 – Condutividade hidráulica não saturada $k(\phi)$ ou $k(\psi)$ utilizando os valores fornecidos pelo método de duas alturas de carga com H correspondendo a 10 cm e 15 cm

ID	H = 10 e 15 cm			
	Condutividade hidráulica não saturada (cm/s)			
	$\psi_m = 0,0981 \text{ kPa}$	$\psi_m = 0,981 \text{ kPa}$	$\psi_m = 9,81 \text{ kPa}$	$\psi_m = 98,1 \text{ kPa}$
PG1a	N/A	N/A	N/A	N/A
PG1b	N/A	N/A	N/A	N/A
PG2a	$2,65 \cdot 10^{-6}$	$1,85 \cdot 10^{-6}$	$5,06 \cdot 10^{-8}$	$1,17 \cdot 10^{-23}$
PG2b	$7,42 \cdot 10^{-6}$	$5,17 \cdot 10^{-6}$	$1,41 \cdot 10^{-7}$	$3,28 \cdot 10^{-23}$
PG3a	$1,90 \cdot 10^{-5}$	$1,33 \cdot 10^{-5}$	$3,63 \cdot 10^{-7}$	$8,41 \cdot 10^{-23}$
PG3b	$1,07 \cdot 10^{-5}$	$7,44 \cdot 10^{-6}$	$2,03 \cdot 10^{-7}$	$4,72 \cdot 10^{-23}$
PG4a	$4,95 \cdot 10^{-6}$	$3,45 \cdot 10^{-6}$	$9,43 \cdot 10^{-8}$	$2,19 \cdot 10^{-23}$
PG4b	N/A	N/A	N/A	N/A
PG5a	N/A	N/A	N/A	N/A
PG5b	$1,33 \cdot 10^{-6}$	$9,25 \cdot 10^{-7}$	$2,53 \cdot 10^{-8}$	$5,86 \cdot 10^{-24}$
PG6a	N/A	N/A	N/A	N/A
PG6b	N/A	N/A	N/A	N/A
Média Aritmética	$7,67 \cdot 10^{-6}$	$5,35 \cdot 10^{-6}$	$1,46 \cdot 10^{-7}$	$3,39 \cdot 10^{-23}$
Média Geométrica	$5,45 \cdot 10^{-6}$	$3,80 \cdot 10^{-6}$	$1,04 \cdot 10^{-7}$	$2,41 \cdot 10^{-23}$

Fonte: Autoria Própria (2022)

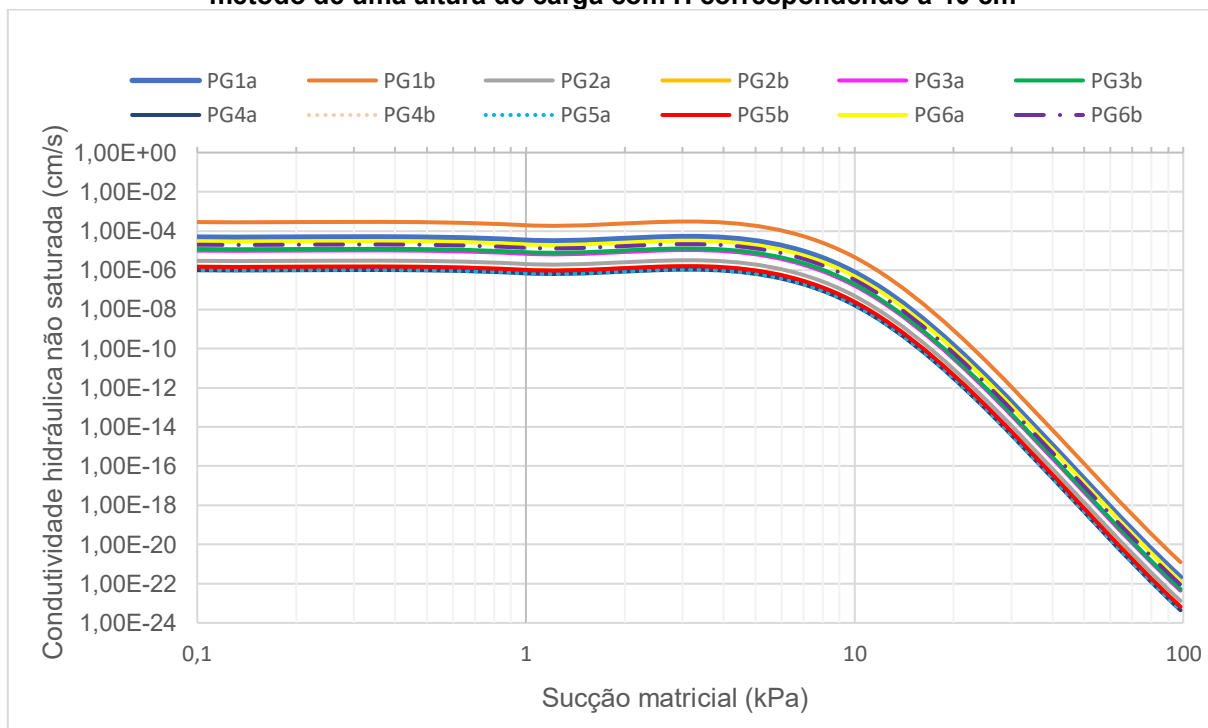
A partir dos resultados foi possível construir os gráficos da condutividade hidráulica não saturada, estando representado nas Figuras 27 a 29 os gráficos para o método de uma altura de carga. Já as Figuras 30 a 32 representam os valores encontrados a partir do método de duas alturas de carga.

Figura 27 – Condutividade hidráulica não saturada utilizando os valores fornecidos pelo método de uma altura de carga com H correspondendo a 5 cm



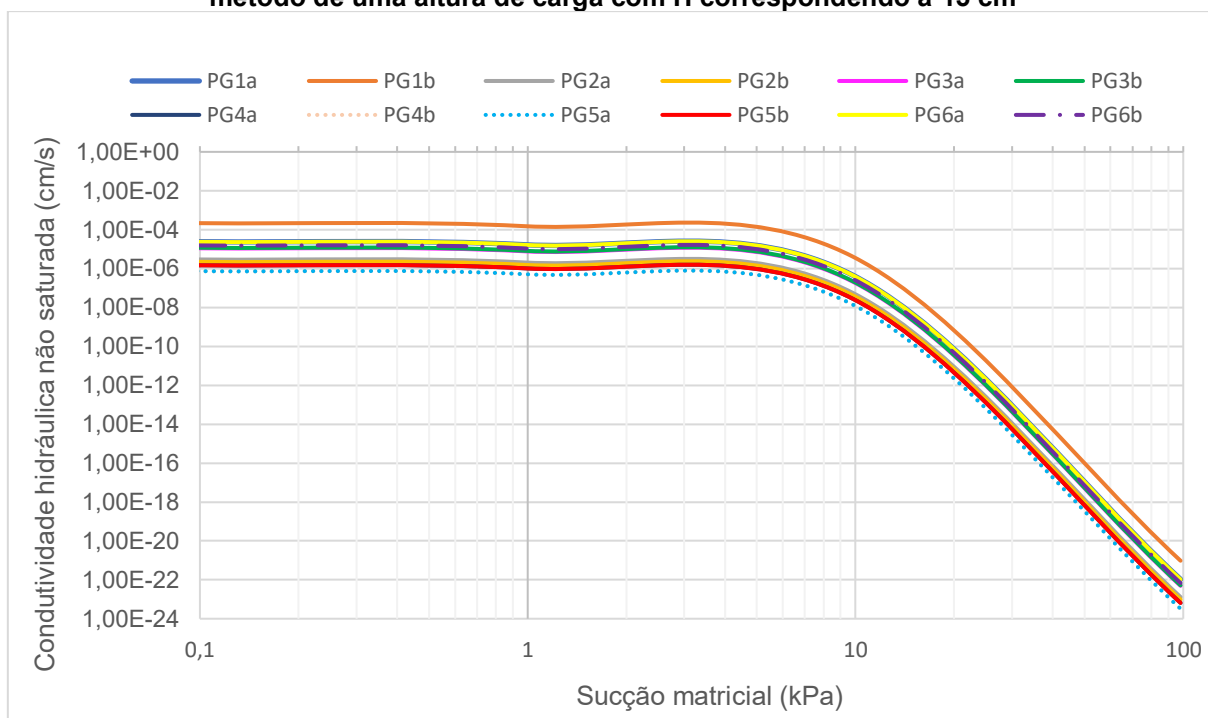
Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 28 – Condutividade hidráulica não saturada utilizando os valores fornecidos pelo método de uma altura de carga com H correspondendo a 10 cm



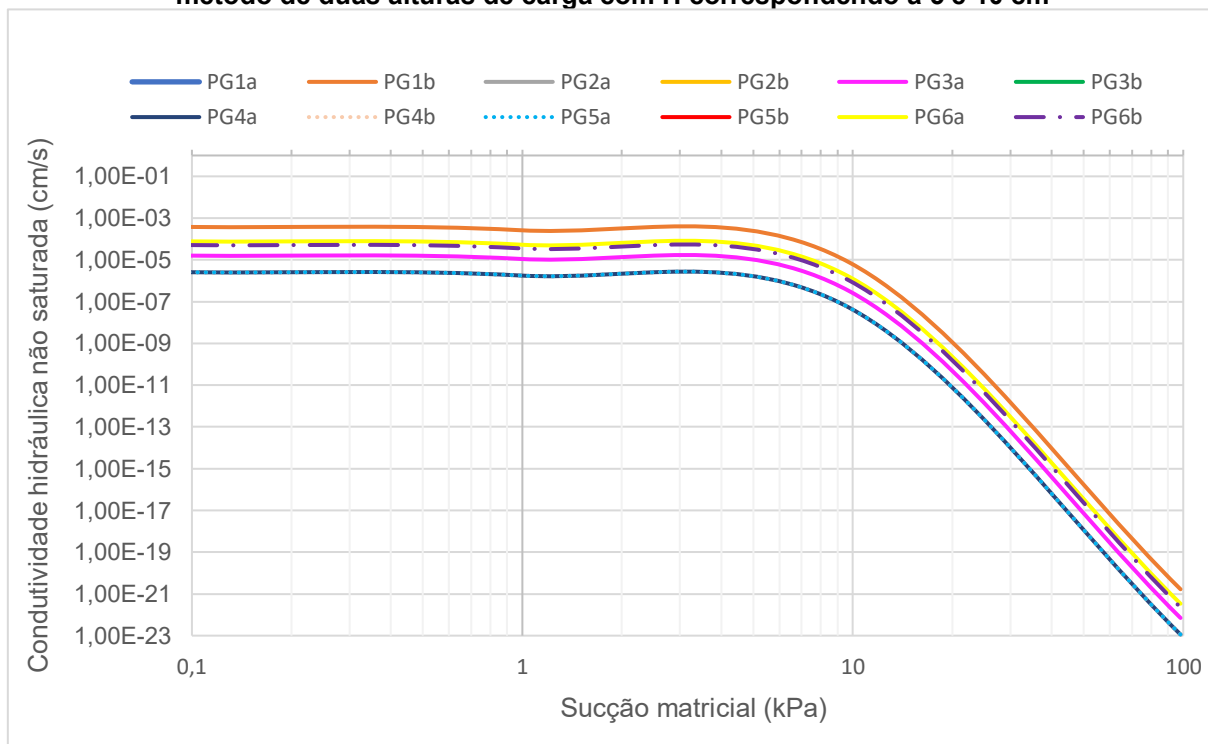
Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 29 – Condutividade hidráulica não saturada utilizando os valores fornecidos pelo método de uma altura de carga com H correspondendo a 15 cm



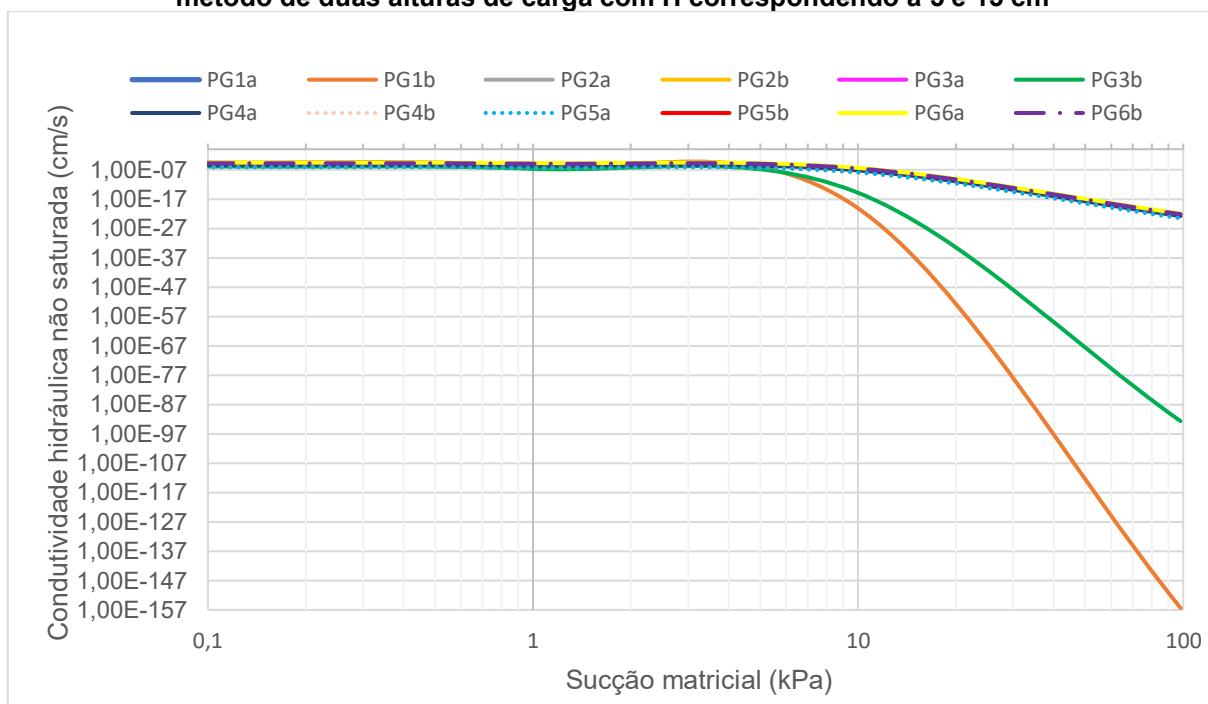
Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 30 – Condutividade hidráulica não saturada utilizando os valores fornecidos pelo método de duas alturas de carga com H correspondendo a 5 e 10 cm



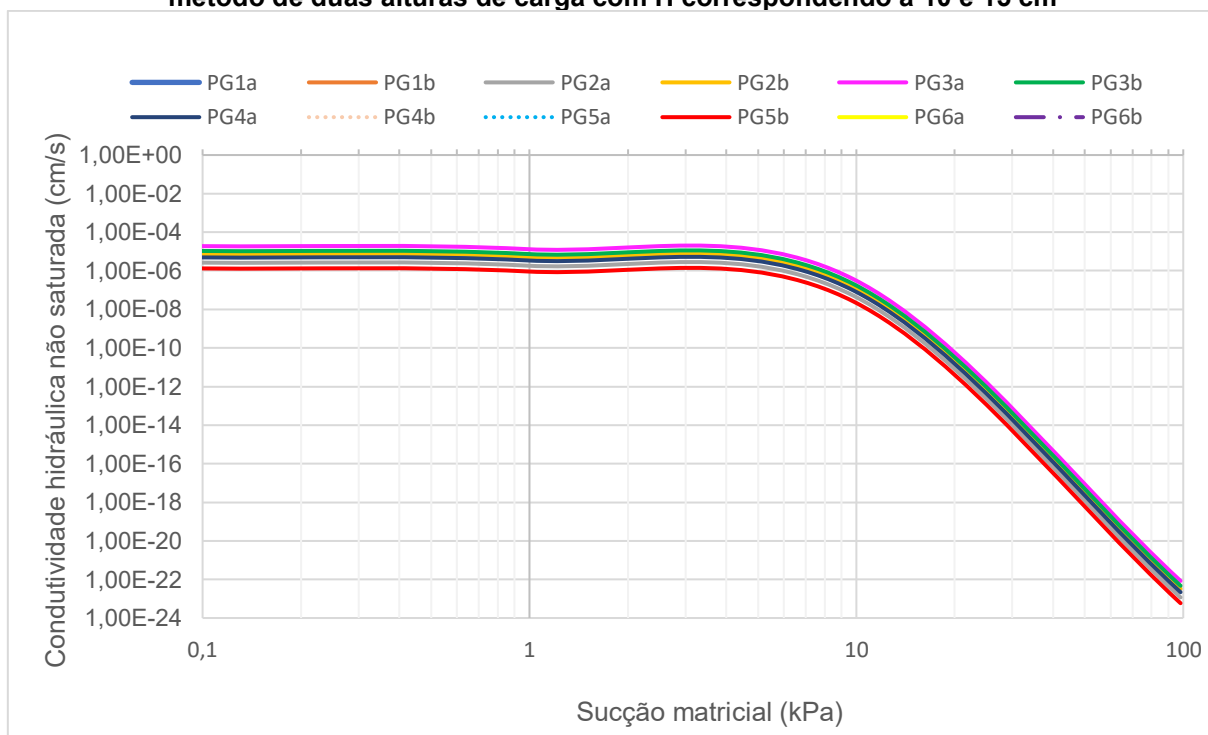
Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 31 – Condutividade hidráulica não saturada utilizando os valores fornecidos pelo método de duas alturas de carga com H correspondendo a 5 e 15 cm



Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 32 – Condutividade hidráulica não saturada utilizando os valores fornecidos pelo método de duas alturas de carga com H correspondendo a 10 e 15 cm



Fonte: Autoria Própria (2022)

Analisando os resultados apresentados anteriormente, é possível observar que os valores tanto da condutividade hidráulica saturada de campo quanto do potencial matricial variaram na ordem de 10^{-5} e 10^{-6} . Não foi possível realizar uma correlação dos valores de condutividade hidráulica saturada de campo com a granulometria do solo, visto que os resultados do ensaio de sedimentação (determinação de partículas de silte e argila) não ficaram coerentes e que a quantidade de amostras de solo não permitiram a repetição de tal ensaio. Além disso, também notou-se que para alguns pontos de ensaio o operador teve certa dificuldade para girar o trado cavadeira e atingir a profundidade desejada na abertura do furo de sondagem, sugerindo que o solo possa estar compactado e não na condição natural, como era esperado para a presente pesquisa.

Essa pesquisa pressupunha que a variação da cota altimétrica influenciasse diretamente nos valores da condutividade hidráulica saturada, porém, não verificou-se tal relação com os valores encontrados para as diferentes localidades dos ensaios. Um possível indício dessa situação pode estar associado com o fato do solo ensaiado não encontrar-se na condição natural mas sim, compactado.

Baseado nos estudos realizados para a região do município de Apucarana em que foram determinados os valores de condutividade hidráulica saturada de campo com uso do permeômetro Guelph, encontrou-se o trabalho de Takenaga *et al.* (2020). Nesse trabalho, os autores delimitaram a área de estudo um local descampado e coberto por gramíneas localizado atrás do Laboratório de Geotecnia (Bloco P) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Apucarana. Os ensaios de permeabilidade foram conduzidos utilizando o permeômetro Guelph a partir do método de uma altura de carga, os quais encontram-se apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Parâmetros resultantes dos ensaios utilizando-se o permeômetro Guelph

Ensaio	PG1	PG2	PG3	PG4
Condutividade Hidráulica Saturada de Campo - k_{fs} (cm/s)	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$7,7 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$
Potencial Matricial de Fluxo - Φ_m (cm ² /s)	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$
Parâmetro α (cm ⁻¹)	0,04	0,04	0,04	0,04

Fonte: Takenaga, et al. (2020)

Na Tabela 19 é possível observar que a condutividade hidráulica saturada de campo variou de 10^{-4} a 10^{-5} cm/s enquanto que o potencial matricial de fluxo variou de 10^{-3} a 10^{-4} cm²/s. Dessa maneira, evidencia-se que o valor de condutividade hidráulica saturada de campo determinado na presente pesquisa para a mesma área de estudo (Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Apucarana), encontra-se na faixa de variação de $1,9 \cdot 10^{-4}$ a $1,4 \cdot 10^{-5}$ cm/s.

Além do trabalho de Takenaga *et al.* (2020), também existem outros trabalhos realizados na região próxima da área de estudo como de Sousa e Celligoi (2011), Barbosa (2014), Puzzi (2015) e Rodriguez *et al.* (2015), nota-se que Sousa e Celligoi (2011) encontraram uma faixa de valor de condutividade hidráulica saturada entre $1,8 \cdot 10^{-3}$ e $7,7 \cdot 10^{-3}$ cm/s para um latossolo e um nitossolo do município de Londrina, Paraná, numa profundidade de 0,35 m. Barbosa (2014) determinou a condutividade hidráulica num latossolo no município de Rolândia, Paraná, encontrando uma variação de valores de $1,3 \cdot 10^{-5}$ a $1,9 \cdot 10^{-4}$ cm/s. Puzzi (2015) encontrou o valor da condutividade hidráulica de $5,5 \cdot 10^{-3}$ cm/s num latossolo de Londrina, Paraná. Já no trabalho de Rodriguez *et al.* (2015), determinaram a condutividade hidráulica saturada num latossolo de Londrina, Paraná, obtendo valor de $3,7 \cdot 10^{-4}$ cm/s. Conforme é possível analisar, os valores encontrados no presente trabalho ($2,26 \cdot 10^{-4}$ a $7,84 \cdot 10^{-7}$ cm/s) contemplam boa parte da faixa de valores da condutividade hidráulica saturada em solos da região do município de Apucarana.

5 CONCLUSÕES

O objetivo geral desta pesquisa, determinar a condutividade hidráulica não saturada e saturada do solo natural *in situ* com uso do permeâmetro Guelph para diferentes locais do município de Apucarana-Paraná, foi alcançado. Apesar da variação da cota altimétrica das seis localidades, a condutividade hidráulica não apresentou uma grande variação, visto que, variou em média na ordem de 10^{-5} e 10^{-6} cm/s.

De acordo com os resultados da análise granulométrica, mesmo apesar de não ter sido completamente concluída (devido ao processo de homogeneização no ensaio de sedimentação) é possível observar que em todos os pontos ensaiados há uma predominância de silte e argila, representam no mínimo 95% da amostra, sendo equivalentes há mesma classificação seguindo o coeficiente de permeabilidade. Os resultados do Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Índice de Plasticidade, apresentaram valores próximo de outros trabalhos realizados no solo de Apucarana, resultando numa faixa similar de variação com os encontrados nessa pesquisa.

Em relação aos ensaios de permeabilidade *in situ*, os menores valores encontrados da condutividade hidráulica saturada foram para as localidades que o solo possivelmente não encontra-se na condição natural. Esse fato pode estar relacionado com a dificuldade da abertura do furo de sondagem bem como da percolação da água na estrutura do solo, ocasionando ensaios mais lentos (ou seja, demandar mais tempo para realização desses ensaios) assim como resultando em menores valores de condutividade hidráulica saturada.

Analisando a variabilidade espacial dos resultados da condutividade hidráulica saturada encontrados na presente pesquisa com os resultados encontrados na literatura técnico-científica, é possível verificar uma diferença na ordem de aproximadamente $1,1 \cdot 10^{-2}$ cm/s, indicando que os resultados estão condizentes com pesquisas desenvolvidas próximas da área de estudo.

Tendo como intuito dar continuidade ao presente trabalho, são propostas algumas sugestões para futuras pesquisas de maneira a complementar os estudos apresentados anteriormente, como:

- Realizar ensaios de permeabilidade em outras localidades de Apucarana, preferencialmente nas áreas em que o solo esteja na condição natural;

- Determinar a condutividade hidráulica saturada para diferentes profundidades, analisando a variabilidade desse parâmetro em função da profundidade do furo de sondagem;
- Analisar a variabilidade da permeabilidade para diferentes épocas do ano, verificando a influência da precipitação pluviométrica na determinação desse parâmetro hidráulico.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTS AND METHODS. **ASTM D2850**: Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils. Estados Unidos: ASTM, 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTS AND METHODS. **ASTM D3080**: Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. Estados Unidos: ASTM, 1998.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTS AND METHODS. **ASTM D3385**: Infiltration rate of soils in field using double-ring infiltrometer. Estados Unidos: ASTM, 1988.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTS AND METHODS. **ASTM D4767**: Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. Estados Unidos: ASTM, 2004.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTS AND METHODS. **ASTM D7181**: Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. Estados Unidos: ASTM, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292**: Solo – determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1995. 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545**: Solo – determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2000. 12p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 12p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: Grãos de solos que passam na peneira #4,8mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 10p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 1995. 18p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 12p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 9p.

AZEVEDO, F. S. **Estudo experimental da influência de tensões na permeabilidade de rochas produtoras de petróleo**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2005.

BARBOSA, M.C. **Utilização do permeâmetro Guelphno antigo depósito de resíduos de Rolândia-PR**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2014. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/5288>. Acesso em: 30 ago. 2020.

BETIM, L. S. **Caracterização da condutividade hidráulica dos solos e estudo da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos da sub-bacia do córrego Palmital - Viçosa/MG**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geotecnia; Saneamento ambiental) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

BHERING, S. B.; SANTOS, H. G. **Mapa de solos Estado do Paraná: legenda atualizada**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2008.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. **Mecânica dos solos**. Viçosa: Universidade de Viçosa, 1980.

CAMPOS, D. J. F. *et al.* Estudo do comportamento de solos característicos do Distrito Federal reforçados com fibras de sisal e polipropileno para o uso em pavimentação: estudo de caso. *In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO (RAPV)*, 45.; *ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA (ENACOR)*, 19.; *EXPOPAVIMENTAÇÃO*, 5.; *FÓRUM RODOVIÁRIO DE TRÂNSITO E DE MOBILIDADE*, 1., 2016, Brasília, DF. **Anais [...]**. Brasília: ABDER; ABPv; DER, 2016. p. 1-13.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

CARVALHO, M. V. **Influência do reuso de amostras no ensaio de compactação de dois latossolos de Minas Gerais**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2019.

DUTRA, M. A. Origem do solo de “terra roxa” no Norte do Paraná: o município de Apucarana e suas singularidades. *In: PARANÁ*. Secretaria de Estado da Educação. Superintendência de Educação. **Os desafios da escola pública paranaense na perspectiva do professor PDE**, 2013. Curitiba: SEED/PR., 2016. v. 1. (Cadernos PDE)

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, n. 3, p. 184-193, 1989.

EMBRAPA. **Solos brasileiros**. Brasília: Embrapa, 2011. Disponível em: www.embrapa.br/tema-solos-brasileiros/solos-do-brasil. Acesso em: 03 maio de 2020.

FERNANDES, M. A. **Condutividade hidráulica não saturada de um solo arenoso: aplicação do infiltrômetro de disco**. 2011. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

FLORIANO, C. **Mecânica dos solos**. Porto Alegre: SAGAH, 2016.

GON, F. S. **Caracterização geotécnica através de ensaios de laboratórios de um solo de diabásio da região de Campinas (SP)**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2011.

GROTZINGER, J.; TOM, J. **Para entender a terra**. Porto Alegre: AMGH, 2014.

JENNY, H. **Factors of Soil Formation: a system of quantitative pedology**. New York: McGraw-Hill, 1941.

KNAPPETT, J. A.; CRAIG, R. F. **Craig mecânica dos solos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

LEITE, F. M. **Estudos teóricos e experimentais da permeabilidade em uma areia média**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

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

MACHADO, S. L.; MACHADO, M. F. **Mecânica dos Solos I: conceitos introdutórios**. UFB: Salvador, 1997.

MACÍAS, J.; VARGAS, A.; ARELLANO, F. Conductividad hidráulica en dos sitios del valle Central de Costa Rica: Análisis comparativo de tres metodologías de ensayo en la zona no saturada. **Revista Geológica de América Central**, v. 59, p. 75-100, 2018.

MAGALHÃES, A. C. T. **Heterogeneidade transitória do solo: um novo conceito**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto (Portugal), 2015.

MENDES, R. M. **Estudo das propriedades geotécnicas de solos residuais não saturados de Ubatuba (SP)**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

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

MONTALVAN, E. L. T. **Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo da estação de tratamento de água do município de Cubatão, SP**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, São Paulo, 2016.

- MUGGLER, C. C. *et al.* **Conteúdos básicos de geologia e pedologia para as disciplinas de sol 213, sol 215 e sol 220.** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2005.
- OLIVEIRA, A. F. de. **Análise de estabilidade de um talude de corte localizado nas margens da BR-376, na região de Apucarana.** 2021. 106 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2021. *(no prelo)*
- OLIVEIRA, R. C. S. **Caracterização e avaliação do desempenho mecânico de um solo tratado com lama proveniente do beneficiamento de vidro visando sua aplicação para fins de pavimentação.** 2021. 121 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2021. *(no prelo)*
- PANTOJA, R. G. B. **Análise da fórmula empírica de Hazen para determinação do coeficiente de permeabilidade.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal (RN), 2019.
- PAPINI, C. J. **Estudo comparativo de métodos de determinação do tamanho de partícula.** 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2003.
- PELLEGRINI, D. **O tempo de seo Celso.** Londrina: Gráfica Ipê, 1990.
- PEREIRA, M. G. *et al.* A. Formação e caracterização de solos. *In*: TULLIO, L. (org.). **Formação, classificação e cartografia dos solos.** Ponta Grossa: Atena Editora, 2019. cap. 1, p. 1-20.
- PHILIP, J. R. Approximate analysis of the borehole permeameter in unsaturated soil-water. **Resources Research**, v. 21, n. 7, p. 1025-1033, 1985.
- PINHEIRO, A.; POETA, T. L.; KAUFMANN, V. Capacidade de infiltração de água em solos sob diferentes usos e práticas de manejo agrícola **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 4, n. 2, p. 189-199, 2009.
- PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas.** 3. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2006.
- PUZZI, L. C. M. **Trincheiras de infiltração:** experimento da aplicação na área da UTFPR Campus Londrina. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2015.
- RAGAB, R.; COOPER J. D. Variability of unsaturated zone water transport parameters: Implications for hydrological modelling.1. In situ measurements. **Journal of Hydrology**, v. 148, 1990.
- RAGAB, R.; COOPER J. D. Variability of unsaturated zone water transport parameters: Implications for hydrological modelling.1. In situ measurements. **Journal of Hydrology**, v. 148, 1990.

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.

RIBEIRO, G. F. **Estudo dos fatores do meio físico que influenciam a capacidade de infiltração das águas da bacia hidrográfica vargens de Caldas, Minas Gerais**. 2010. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Campinas, 2010.

RODRIGUEZ, T. T. *et al.* Permeabilidade de solo laterítico por diferentes métodos. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 36, n. 2, p. 17-32, 2015.

SANTOS, J. A. **Ensaio de caracterização em solo**. Lisboa, 2009. (Apostila)

SANTOS, M. M. **Avaliação hidrogeológica para determinação da vulnerabilidade natural do aquífero freático em área selecionada na cidade de Londrina (PR)**. 2005. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005.

SAYÃO, A.; SIEIRA, A. C.; SANTOS, P. **Reforço de Solos: Manual Técnico**. Jundiaí: Maccaferri, 2013.

SCOMPARIN, D. S. **Análise de estabilidade de talude composto por solo argiloso na condição compactada empregando diferentes métodos determinísticos**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2021. *(no prelo)*

SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP. **Guelph Permeameter**. Operating - Instructions, Soilmoisture manual. rev. 8, [S. l.: s. n.], p. 25, 2009.

SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP. **Guelph Permeameter**. Operating Instructions, Soilmoisture manual. rev. 8, [S. l.: s. n.], p. 1-25, 2009.

SOTO, M. A.; CHANG, K. H.; VILAR, O. M. Análise do método do permeâmetro guelphna determinação da condutividade hidráulica saturada. **Águas Subterrâneas**, v. 23, n. 1, p. 137-152, 2009.

SOTO, M. M. A. **Estudo da condutividade hidráulica em solos não saturados**. 1999. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.

SOUSA, R. V. B.; CELLIGOI, A. Avaliação da condutividade hidráulica do solo em área agrícola e florestada na cidade de Londrina (PR) através do permeâmetro Guelph. **Boletim de Geografia**, v. 29, n. 2, p. 123-133, 2011.

SUPO, K. C. L. **Desenvolvimento de Permeâmetro de vazão constante de campo**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

TAKENAGA, F. R. *et al.* Determinação da condutividade hidráulica saturada e estimativa da infiltração de um solo argiloso da região Noroeste do Paraná. *In:*

CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 17., 2020, Campinas. **Anais** [...]. Campinas, SP: COBRAMSEG, 2020. *(no prelo)*

ZIMBACK, C. R. L. **Formação dos solos**. Botucatu: GEPAG, FCA-UNESP, 2003. *(Apostila)*

ANEXO A - AUTORIZAÇÃO N°005/2020



Prefeitura do Município de Apucarana

Centro Cívico José de Oliveira Rosa, nº 25
CEP 86.800-280 | APUCARANA - PR | www.apucarana.pr.gov.br



AUTORIZAÇÃO Nº 005/2020

Em atendimento ao solicitado pela Coordenação do Curso de Engenharia Civil – UTFPR Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Apucarana, através do protocolo nº 36678/2020 de 15/09/2020, que solicita autorização para a realização de ensaios de permeabilidade no solo de praças públicas (Praças: Eugênio DallaCosta, Praça das Mães, Duque de Caxias, Praça da Bíblia, Semframis Braga, Presidente Kennedy e Parque Jaboti).

a. Informamos:

- i. O Município **autoriza** a execução dos ensaios descritos no protocolo e projeto, onde a requerente deverá:
1. No momento da execução sinalizar o local dos ensaios;
 2. Efetuar a devida limpeza do local e recomposição após;
 3. O prazo de execução dos ensaios fica estabelecido até Julho de 2021;
 4. A responsabilidade do acompanhamento dos trabalhos é do requerente através dos professores responsáveis.

Apucarana, 17 de setembro de 2020.

**ENG. CIVIL ANGELÁ STOIAN - CREA PR-61.880/D
SECRETARIA MUNICIPAL DE OBRAS - SEOB**