

**CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
THIAGO JUNIOR FALKOWSKI**

**ANÁLISE DA PERMEABILIDADE DE SOLO ARGILOSO, DO CAMPO
EXPERIMENTAL DE ENGENHARIA DA FAG, ATRAVÉS DE ENSAIOS DE
CARGA VARIÁVEL**

**CASCABEL - PR
2016**

**CENTRO UNIVERSITARIO ASSIS GURGACZ
THIAGO JUNIOR FALKOWSKI**

**ANÁLISE DA PERMEABILIDADE DE SOLO ARGILOSO E POROSO, DO CAMPO
EXPERIMENTAL DE ENGENHARIA DA FAG, ATRAVÉS DE ENSAIOS DE
CARGA VARIÁVEL**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Civil, da Faculdade Assis Gurgacz - FAG, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Professor Orientador: Me. Eng. Civil
Maycon André de Almeida**

**CASCADEL - PR
2016**

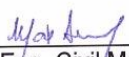
CENTRO UNIVERSITÁRIO FAG

THIAGO JUNIOR FALKOWSKI

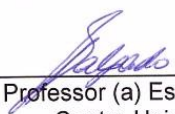
**ANÁLISE DA PERMEABILIDADE DE SOLO ARGILOSO E POROSO, DO CAMPO
EXPERIMENTAL DE ENGENHARIA DA FAG, ATRAVÉS DE ENSAIOS DE
CARGA VARIÁVEL**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário FAG,
como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob
orientação do Professor (a) Me. Eng. Civil Maycon André de Almeida

BANCA EXAMINADORA


Orientador (a) Prof^a. Me. Eng. Civil Maycon André de Almeida
Centro Universitário FAG
Engenheiro Civil


Professor (a) Professor Me. Eng. Guilherme Irineu Venson
Unieste
Engenheiro Civil


Professor (a) Esp. Lincoln Salgado
Centro Universitário FAG
Engenheiro Civil

Cascavel, 01 de Dezembro de 2016.

RESUMO

Este trabalho tem por finalidade apresentar os resultados referentes aos ensaios de permeabilidade a carga variável de solos argilosos, com a água percolando através do solo em regime de escoamento laminar, sendo realizados no laboratório conforme NBR 14545/00 utilizando o método B, que utiliza uma bureta graduada acoplada no orifício superior para aplicação das cargas hidráulicas, este que permitiu a realização de uma análise ao referente a 3 cotas distintas, do subsolo do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz em Cascavel-PR obtendo dados referentes as características de condutividade hidráulica do solo e suas variações que ocorreram ao longo da profundidade, estes que apresentaram valores da ordem de 10^{-5} cm/s para as camadas mais superficiais, e de ordem 10^{-6} cm/s para a camada mais profunda. Esta diferença se deu, devido ao fato de que ocorrem transições decrescentes conforme reduz a cota de profundidade, pois, o índice de vazios do solo superficial tende a apresentar maior índice de vazios em relação ao subsolo, devido a tensão que ele está submetido, além da mudança da camada de solo, de argila siltosa, mole a média para rija a dura. Tendo em vista os resultados obtidos, estes asseguraram os valores específicos para solo que contem em sua composição, argilas e siltes.

Palavras chave: Coeficiente de permeabilidade; Ensaio em laboratório; Características do solo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ensaio de permeabilidade com carga constante.....	20
Figura 3.1 – Local dos Ensaios.....	27
Figura 3.2 – Camisa metálica sendo cravada no solo.....	29
Figura 3.3 – Esquema montado para extração da amostra.....	30
Figura 3.4 – Permeâmetro do Método B.....	31
Figura 3.5 – Corpo de prova parafinado.....	3
Figura 3.6 – Corpo de prova posicionado no centro e aplicação de argila bentonita.....	34
Figura 3.7 – Corpo de prova isolado pela argila bentonita.....	36
Figura 3.8 – Permeâmetro em funcionamento.....	37

LISTA DE GRAFICOS

Gráfico 4.1 –Variação de k para as cotas -2 e -8 e -15 metros de profundidade.....	38
Gráfico 4.2 – Comparação com os dados de permeabilidade <i>In situ</i>	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Relação entre a viscosidade da água na temperatura de ensaio e a viscosidade da água a 20° C (RT).....	16
Tabela 2.2 – Valores típicos como ordem de grandeza para o coeficiente de permeabilidade.....	17
Tabela 2.3 –Caracterização do grau de permeabilidade dos solos segundo seus coeficientes de permeabilidade, considerando o funcionamento de sumidouros de água pluvial e drenagem.....	17
Tabela 3.1 – Valores médios por camadas.....	27
Tabela 4.1 – Valores dos coeficientes de permeabilidade.....	38

LISTA DE SÍMBOLOS

k : Coeficiente de permeabilidade.

γ : Peso específico do fluido.

e : Índice de vazios.

C : Fator de forma.

D : Diâmetro efetivo das partículas.

μ : Viscosidade do fluido.

k_o : Fator dependente da forma dos poros e da trajetória da linha de fluxo.

S : Superfície específica.

V : Velocidade de escoamento.

i : Gradiente hidráulico.

Q : Vazão.

L : Altura inicial da amostra.

A : Área inicial da amostra onde flui a água.

h : Carga hidráulica.

t : Tempo de escoamento.

a : Área inicial transversal do piezômetro.

hf : Carga hidráulica final.

hi : Carga hidráulica inicial.

π : Proporção numérica (3.14159).

V_i : Volume inicial do corpo de prova.

ρ_s : Massa específica dos grãos,

S_r : Grau de saturação inicial do corpo de prova,

P_w : Massa específica da água.

Δt : Dado pela diferença entre os instantes t_2 e t_1 .

A : Área interna da bureta de vidro.

H : Altura inicial do corpo de prova.

SUMÁRIO

CAPITULO 1	11
1.1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS	12
1.2.1 Objetivo Geral	12
1.2.2 Objetivos Específicos	12
1.2 JUSTIFICATIVA	12
1.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	13
1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	13
CAPÍTULO 2	14
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1.1 Solo.....	14
2.1.1.1 Solo laterítico.....	14
2.1.1.2 Solo colapsível.....	15
2.1.2 Permeabilidade do solo.....	15
2.1.2.1 Fatores que influenciam na permeabilidade	16
2.1.3 Determinação do coeficiente de permeabilidade (k)	19
2.1.3.1 Métodos diretos	20
2.1.3.1.1 Permeabilidade de carga constante	20
2.1.3.1.2 Permeabilidade de carga variável	21
2.1.3.2 Ensaio de infiltração	24
CAPÍTULO 3	27
3.1 METODOLOGIA	27
3.1.1 Especificações da pesquisa e localização do solo estudado	27
3.1.2 Caracterização do solo local	28
3.1.3 Coleta das amostras e realização dos furos de sondagem	29
3.1.4 Tipo de ensaio de permeabilidade	30
3.1.5 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	31
CAPÍTULO 4	39
4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1.2 COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE	39
CAPÍTULO 5	42
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	42
CAPÍTULO 6	43

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	43
REFERÊNCIAS	44
ANEXOS	46

CAPITULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

A permeabilidade do solo tem grande importância quando se trata em construção civil, pois estão associadas com todo tipo de estrutura hidráulica, podendo citar várias obras, no qual é importante saber a condutividade hidráulica do solo em que serão implantadas, como por exemplo, a resistência do solo propriamente dita, drenagem de recalque, rebaixamento de aquífero, sumidouros fossas sépticas, dentre outras diversas obras que podem causar transtorno se não forem levados em conta o valor do coeficiente de permeabilidade.

Segundo Diemer (2008), a água é um elemento muito presente nos solos, ocupando parcialmente ou todo os seus vazios. Quando este fluido é submetido as diferenças altimétricas, desloca-se no interior do solo, causando as tensões desiguais.

Este parâmetro é conhecido como coeficiente de permeabilidade, no qual é representado pela distância por uma unidade de tempo, sendo que depende de vários fatores tais como: viscosidade do fluido, granulometria do solo, grau de saturação e estrutura do solo. (RODRIGUES *et al*, 2015).

De acordo com Pinto (2002) os coeficientes de permeabilidade são proporcionais ao índice de vazios do solo e ao tamanho de suas partículas, sendo assim, quanto menor os índices de vazios e mais irregulares forem os grãos, menor será o coeficiente de condutividade hidráulica.

Martins *et al.*, (2002), *apud* SAMPAIO (2004), citam que a permeabilidade é um dos atributos físicos de maior importância para se determinar a qualidade do solo, esta que depende de três fatores, quantidade de água presente, continuidade e tamanho dos poros.

Além disso, o estudo dos coeficientes de permeabilidade da água no solo é de grande importância, pois ela intervém em inúmeros problemas práticos, podendo-se agrupar em três tipos: cálculo das vazões, esta que se aplica na estimativa da quantidade de água se infiltra numa escavação, análise de recalques, que estão diretamente ligados à diminuição dos índices de vazios quando a água é expulsa destes poros. (Pinto,2000; *apud* SAMPAIO,2004).

1.1 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Determinar os coeficientes de permeabilidade do solo através de ensaios de carga variável de amostras indeformadas, extraídas do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz em Cascavel-PR

1.2.2 Objetivos Específicos

- Executar ensaios de laboratório a partir de amostras indeformadas retiradas em campo para determinação dos coeficientes de permeabilidade;
- Comparar os resultados obtidos com resultados de outras bibliografias.

1.2 JUSTIFICATIVA

O estudo da permeabilidade no subsolo é de grande importância, pois com os dados obtidos será possível verificar como ocorre a movimentação da água no solo, direcionando a forma com que deverão ser realizados os projetos que necessitam tal estudo.

Existem vários estudos referente a solo e permeabilidade, porem estes se limitam apenas ao local de pesquisa, tendo em vista a necessidade da realização do estudo para cada local individualmente, pois o solo varia de acordo com a região.

Como houve recentes incentivos a compra da casa própria por parte do governo federal, que resulta na expansão do território urbano nas cidades, isto acaba gerando um problema referente ao descarte do esgoto, que as vezes são áreas onde a companhia de saneamento básico local ainda não oferece estrutura suficiente para atender a essa demanda, uma solução adotada é a abertura de fossas sépticas, e este estudo fornece dados que possibilitam a execução da mesma.

1.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Qual a resistência que o solo do CEEF oferece a passagem de água por seus vazios, através de ensaios de permeabilidade a carga variável de solos argilosos, na cidade de Cascavel-PR

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Restringe-se a pesquisa em determinar os dados de condutividade hidráulica do solo do CEEF por meio de ensaios de carga variável de solos argilosos por ser o mais indicado para solos finos conforme a NBR 14545/00, foram extraídas duas amostras por cota analisada, sendo -2, -8 e -15, e levadas ao laboratório para determinação dos coeficientes de permeabilidade

CAPÍTULO 2

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 Solo

O solo é formado através da ação de fatores, em rochas, que podem ser físicos ou mecânicos, químico e biológico. A sua origem depende da ação do clima, dos organismos, do relevo e do tempo, e são materiais que resultam do intemperismo das rochas, por desintegração mecânica ou decomposição química (Caputo, 1988).

Segundo Pinto (2006), o solo é um material composto de partículas de água e ar nos espaços intermediários. As partículas, de maneira geral, encontram-se livres para deslocar-se entre si e o seu comportamento depende do movimento das partículas sólidas entre si.

Por decomposição química, pode-se dizer que no processo em que há modificações químicas ou mineralógicas das rochas de origem, o principal agente é a água e os mais importantes mecanismos de ataque são a oxidação, hidratação, carbonatação, e os efeitos químicos da vegetação. As argilas representam o último produto do processo de decomposição.

Os solos argilosos têm condutibilidade hidráulica baixa se comparado a outros solos e, por isso, armazenam mais água,

O comportamento argiloso do solo não é apenas determinado pelo teor de argila, mas também a sua atividade. Os índices de consistência são o que melhor indicam o comportamento argiloso (PINTO, 2006).

De acordo com Caputo (1988), o terreno argiloso caracteriza-se pelos grãos microscópicos, de cores vivas e de grande impermeabilidade. Em termos de comportamento a argila é o oposto da areia. Devido a sua plasticidade e capacidade de aglutinação o solo argiloso é utilizado há milhares de anos como argamassa de assentamento, argamassa de revestimento e na preparação de tijolos.

2.1.1.1 Solo laterítico

De acordo com Pinto (2006), os solos laterítico tem sua fração de argila constituída predominantemente de minerais cauliníticos e apresentam elevada confluência de ferro e alumínio na forma de óxidos e hidróxidos, do qual resulta sua particular coloração avermelhada.

Na natureza, os solos lateríticos apresentam-se, geralmente, não saturados, com índice de vazios elevado, daí sua baixa capacidade de suporte. Quando compactados, sua capacidade de suporte é elevada. Depois de compactado, o solo laterítico apresenta contração se o teor de umidade diminuir, mas não apresenta expansão na presença de água.

2.1.1.2 Solo colapsível

Denominam-se solos colapsáveis aqueles que apresentam alto teor de porosidade, formados tanto por areias como por argilas e apresentam a característica de ter suas partículas unidas por uma espécie de cimentação, proporcionada por materiais como o calcário (REBELLO, 2008).

Segundo Radoll (2014), *apud* Mendonça (1990), o colapso é um fenômeno observado em alguns solos não saturados que apresentam súbita redução de volume quando o teor de umidade aumenta, podendo ser também necessário modificar o estado de tensões atuantes. Deve-se entender como súbita redução de volume a velocidade muito superior de adensamento se comparado a outros tipos de solo.

A NBR 6122/2010 – Projeto e Execução de Fundações define solos colapsíveis como solos que apresentam grande redução de volumes quando são submetidos a acréscimos de umidade, sob a ação de carga externa. A norma assegura que, deve ser considerada, no projeto e no método construtivo a possibilidade de ocorrer encharcamento do solo.

Segundo Pinto (2006), colapsíveis são solos não saturados que apresentam uma considerável e rápida compressão quando submetidos a um aumento de umidade sem que varie a tensão total a que estejam submetidos.

2.1.2 Permeabilidade do solo

A permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento da água através dele, sendo o grau de permeabilidade expresso numericamente pelo coeficiente de permeabilidade (CAPUTO, 1996).

De acordo com PAZZETO (2009), conhecimento do valor da permeabilidade é muito importante em algumas obras de engenharia, essencialmente, na estimativa da vazão que percolará pelo meio do maciço e da fundação em barragens de terra, em obras de drenagem, rebaixamento do nível d'água, adensamento, etc.

Consequentemente, os mais sérios problemas de construção estão conexos com a presença da água. A informação da permeabilidade e de sua variação é fundamental para a solução desses problemas.

2.1.2.1 Fatores que influenciam na permeabilidade

A permeabilidade do solo depende de uma série de fatores, dentre os quais se destacam são;

- **O índice de vazios (e):** o coeficiente de permeabilidade é diretamente proporcional ao índice de vazios (e) da amostra, ou seja, quanto maior for o “e” maior será o valor de k (coeficiente de permeabilidade). Quanto mais compacto estiver o solo, menor sua permeabilidade, pois os tamanhos e forma dos canalículos serão menores.
- **A temperatura da água:** viscosidade da água depende da temperatura, quanto maior o valor da temperatura da água menor a sua viscosidade e mais facilmente água flui, aumentando o coeficiente de permeabilidade. Este fator tem importância para os ensaios de laboratório. De acordo com a norma NBR14545/2000 deve-se corrigir a temperatura para o valor de 20 ° C, conforme a Equação 2.1

$$K_{20} = RT \cdot K \quad (2.1)$$

Onde:

K₂₀ é o coeficiente de permeabilidade referido à temperatura de 20° C, em centímetro por segundo;

RT é a relação entre a viscosidade da água na temperatura de ensaio e a viscosidade da água a 20° C, obtida na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Relação entre a viscosidade da água na temperatura de ensaio e a viscosidade da água a 20° C (RT)

Temperatura °C	R _T									
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
8	1,374	1,370	1,366	1,362	1,358	1,354	1,352	1,348	1,344	1,34
9	1,336	1,332	1,328	1,325	1,321	1,318	1,314	1,310	1,306	1,302
10	1,298	1,294	1,292	1,288	1,284	1,281	1,277	1,273	1,269	1,266
11	1,262	1,259	1,256	1,252	1,249	1,245	1,241	1,238	1,234	1,231
12	1,227	1,224	1,221	1,218	1,215	1,211	1,208	1,205	1,202	1,198
13	1,195	1,192	1,189	1,186	1,183	1,18	1,177	1,174	1,17	1,167
14	1,165	1,162	1,159	1,156	1,153	1,15	1,147	1,144	1,141	1,138
15	1,135	1,132	1,129	1,126	1,123	1,121	1,118	1,115	1,112	1,109
16	1,106	1,103	1,100	1,098	1,095	1,092	1,089	1,086	1,084	1,081
17	1,078	1,075	1,073	1,07	1,067	1,064	1,062	1,059	1,056	1,054
18	1,051	1,048	1,046	1,043	1,041	1,038	1,035	1,033	1,030	1,028
19	1,025	1,0123	1,02	1,018	1,015	1,013	1,010	1,008	1,005	1,003
20	1,000	0,998	0,995	0,993	0,991	0,989	0,986	0,984	0,982	0,979
21	0,975	0,973	0,971	0,968	0,966	0,964	0,961	0,959	0,957	0,954
22	0,952	0,950	0,948	0,945	0,943	0,941	0,939	0,937	0,934	0,932
23	0,930	0,928	0,926	0,923	0,921	0,919	0,917	0,915	0,912	0,910
24	0,908	0,906	0,904	0,902	0,900	0,898	0,895	0,893	0,891	0,889
25	0,887	0,885	0,883	0,881	0,879	0,877	0,875	0,873	0,871	0,869
26	0,867	0,865	0,863	0,861	0,859	0,857	0,855	0,853	0,851	0,849
27	0,847	0,845	0,843	0,841	0,839	0,838	0,836	0,834	0,832	0,83
28	0,828	0,826	0,825	0,823	0,821	0,820	0,818	0,816	0,814	0,813
29	0,811	0,809	0,807	0,806	0,804	0,802	0,800	0,798	0,797	0,795
30	0,793	0,791	0,789	0,788	0,786	0,784	0,782	0,78	0,779	0,777
31	0,776	0,775	0,773	0,772	0,770	0,768	0,767	0,765	0,763	0,762

Fonte: NBR 14545/00

- **Densidade e viscosidade da água:** quanto mais pesada e viscosa for à água maior será a dificuldade com que atravessará os poros do solo.
- **Tipo de solo:** Solos granulares, como pedregulhos e areias, apresentam maior k. Solos finos, siltes e argilas apresentam menor K.

2.1.2.2 Valores típicos de coeficiente de permeabilidade

A caracterização da permeabilidade do solo pode ser demonstrada por alguns valores típicos, como os apresentados por Pinto (2006) e Neto (2007), que relacionam valores típicos de coeficiente de permeabilidade e a classificação do grau de permeabilidade dos solos para a execução de sumidouros de água de chuva e de drenagem, segundo seu coeficiente de permeabilidade, conforme a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Valores típicos como ordem de grandeza para o coeficiente de permeabilidade.

Solo	Valor de k
Argilas	$<10^{-7}$ cm/s
Siltes	10^{-5} a 10^{-7} cm/s
Areias argilosas	10^{-3} a 10^{-5} cm/s
Areias finas	10^{-2} a 10^{-3} m/s
Areias médias	10^{-2} a 0,1 cm/s
Areias grossas	$>0,1$ cm/s

Fonte: Pinto, 2006.

De acordo com NETO (2007), apud FANTINATTI et al. (2006), pode-se constatar que os ensaios realizados em laboratório, apresentam como grande vantagem ter as condições bem controladas, porém tem como desvantagem, o fato de que as características dos copos de prova não serem mantidas sempre, durante a extração e transporte da amostra, moldagem do corpo de prova. Alguns valores referentes ao grau de permeabilidade estão contidos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Caracterização do grau de permeabilidade dos solos segundo seus coeficientes de permeabilidade, considerando o funcionamento de sumidouros de água pluvial e drenagem.

Grau de permeabilidade	Valor de k
Praticamente impermeável	$<10^{-9}$ cm/s
Muito baixa	10^{-7} a 10^{-9} cm/s
Baixa	10^{-5} a 10^{-7} cm/s
Média	10^{-3} a 10^{-5} cm/s
Elevada	$>10^{-3}$ cm/s

Fonte: Lambe e Whitman, 1976 apud Neto, 2007

2.1.3 Determinação do coeficiente de permeabilidade (k)

Á água pode percolar livremente, através de uma massa de um solo permeável sob a ação da gravidade. Através de alguns experimentos, Darcy, em 1850, percebeu que os diversos fatores geométricos, influenciavam a vazão da água, expressando a equação que ficou conhecida pelo seu nome e é representada pela Equação 2.2 (PINTO, 2002).

$$Q = \frac{k \cdot h \cdot A}{L} \quad (2.2)$$

Onde:

Q = vazão;

A = área do Permeâmetro;

k = uma constante para cada solo, que recebe o nome de coeficiente de permeabilidade.

A relação h (a carga que se dissipa na percolação) por L (distância ao longo da qual a carga se dissipa) é chamada de gradiente hidráulico, expresso pela letra i , que representa a dissipação de energia, por unidade de peso de fluxo, numa distância Δs . Assim a Lei de Darcy assume o formato apresentado pela Equação 2.3

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (2.3)$$

A vazão dividida pela área indica a velocidade com que a água sai da areia. Esta velocidade, v , é chamada de velocidade de percolação. Na prática é mais conveniente trabalhar com a área total A da seção transversal da amostra do solo do que com a área média de seus vazios. Daí, então, o coeficiente de permeabilidade k , definido como sendo a velocidade média aparente v de escoamento da água através da área total (sólidos + vazios) da seção transversal do solo, sob um gradiente hidráulico ($i = 1$), conforme Equação 2.4

$$v = k \cdot i \quad (2.4)$$

Da última expressão, se depreende que o coeficiente de permeabilidade indica a velocidade de percolação da água quando o gradiente é igual a um. Ele costumeiramente é referido em m/s e, como para os solos seu valor é muito baixo, é expresso pelo produto de um número inferior a 10 por uma potência de 10.

A lei de Darcy é válida para um escoamento laminar, tal como é possível e deve ser considerado o escoamento na maioria dos solos naturais.

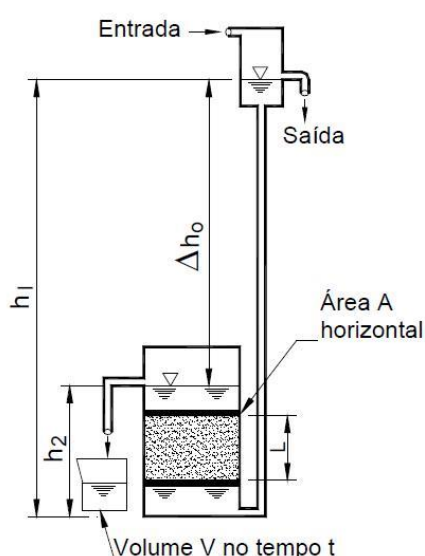
Um escoamento se define laminar quando as trajetórias das partículas d'água não se cortam; em caso contrário, denomina-se turbulento (CAPUTO, 2006).

2.1.3.1 Métodos diretos

2.1.3.1.1 Permeabilidade de carga constante

Ensaio de permeabilidade de carga constante, e recomendada para solos granulares como areias, pedregulhos e solos com granulometria mais grossa, este ensaio geralmente consiste na medida de um volume do líquido que percola através de regime laminar, um corpo de prova devidamente preparado, com altura e seção conhecidas, conforme a Figura 2.1, e é calculado pela lei de Darcy, onde relaciona a vazão atuante e a área da amostra, como apresenta a Equação 2.5

Figura 2.1 – Ensaio de permeabilidade com carga constante.



Fonte: Ribeiro, 2002.

$$k = \frac{Q L}{A t h} \quad (2.5)$$

Onde: k = coeficiente de permeabilidade da amostra (cm/s);

Q = vazão (cm³/s);

L = altura inicial da amostra (cm);

A = área da amostra onde flui a água (cm²);

h = carga hidráulica;

t = tempo de escoamento da água (s).

2.1.3.1.2 Permeabilidade de carga variável

O ensaio de permeabilidade em carga variável é feito com base na NBR 14545/2000, que determina os procedimentos para determinação do coeficiente de permeabilidade de carga variável, para solos com granulometria mais fina, como argilas e siltes.

- Para execução do ensaio é necessário o uso de um Permeâmetro conforme a NBR 14545/2000, O Permeâmetro é constituído por um cilindro metálico 15 cm de diâmetro e 13 cm de altura, acoplado a duas tampas, além de um orifício que permite na fase de saturação do corpo de prova a entrada de água e na fase de leitura a sua saída.
- Para Medição e aplicação das cargas hidráulicas o sistema é constituído por uma bureta de vidro graduada em décimos de centímetros, formando com o Permeâmetro;
- Areia grossa que será empregada como material filtro no topo e na base do corpo de prova;
- Extrator de amostra, como a amostra será do tipo indeformada e retirada do subsolo com auxílio de um amostrador (camisa metálica), a amostra será removida do amostrador com auxílio de um extrator;
- Equipamento para talhagem do corpo de prova com as dimensões desejadas, foram utilizadas uma faca e uma régua metálica biselada para dar acabamento;
- Instrumentos para medição do corpo de prova, serão necessários paquímetro, para medir altura e diâmetro, com resolução de 0,1mm;

- Balanças que permitam pesar nominalmente 200g e 1500g em resoluções de 0,01g e 0,1g, respectivamente, e sensibilidades compatíveis;
- Termômetro com resolução de 0,1°C;
- Cronometro com indicação de segundo;
- Bomba de vácuo para auxiliar na deaeração das linhas de fluxo;
- Água percolante, que será utilizada para fluir no corpo de prova;
- Molde necessário para o corpo de prova deverá ser de no mínimo 10cm de diâmetro e altura, lembrando que a superfície lateral do corpo de prova deverá ser revestida com uma fina camada de parafina aplicada no estado líquido com uso de pincel.

2.1.4.3.2 Procedimento do Ensaio de acordo com método B da NBR 1454/2000;

- a) A base do Permeâmetro deverá ser preparada colocando na tampa inferior uma tela de arame com malha de abertura 2mm e, sobre ela, uma camada de areia grossa com espessura da ordem de 1cm, que será recoberta por um anel de borracha para evitar o seu contato com a argila plástica que envolvera o corpo de prova;
- b) Em seguida, será acoplado o cilindro metálico a base preparada;
- c) Posicionar o corpo de prova no centro do cilindro e envolve-lo com argila plástica.
- d) A argila deverá ser colocada em camadas da ordem de 2cm de altura, compactando-se os bastões de forma a evitar o aparecimento de caminhos preferenciais entre as paredes do cilindro e do corpo de prova;
- e) Colocar um anel de borracha cobrindo o topo do anel formado pela argila circundante ao corpo de prova, preencher o restante da altura do cilindro com areia grossa e fechar o conjunto com a tampa superior;
- f) Saturar o corpo de prova por meio de percolação no sentido ascendente, efetuada pelo orifício localizado na tampa inferior, o processo só será satisfatório quando ocorrer o surgimento de água no orifício localizado na tampa superior e a percolação se processar sem a presença de bolhas de ar;
- g) Colocar o sistema de aplicação e medição de cargas hidráulicas ao orifício localizado na tampa superior e iniciar o ensaio propriamente dito, anotando as medidas das cargas hidráulicas, dos tempos decorridos e da temperatura da água que percola pelo corpo de prova;
- h) Prosseguir o ensaio até a obtenção de pelo menos quatro determinações do coeficiente

de permeabilidade relativamente próximos, os quais não apresentem tendências evidentes, de crescimento ou de diminuição.

Será calculada a massa seca (dos sólidos) do corpo de prova, de acordo com a equação (2.5):

$$M_s = \left(\frac{M}{100 + w} \right) 100 \quad (2.5)$$

Onde:

M_s = Massa seca (dos sólidos) do corpo de prova, em gramas;

M = é a massa do corpo de prova, em gramas;

w = é o teor de umidade inicial, em percentagem.

Calcular a massa específica aparente seca inicial do corpo de prova e, se disponível os demais índices físicos iniciais. Conforme a Equação 2.6, a Equação 2.7, e a Equação 2.8.

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_i} \quad (2.6)$$

$$e_i = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (2.7)$$

$$S_r = \frac{P_{sw}}{\rho_{we_i}} \quad (2.8)$$

Onde:

ρ_d = é a massa específica aparente seca inicial do corpo de provas, em gramas por centímetro cúbico;

V_i = é o volume inicial do corpo de prova determinado a partir de suas dimensões iniciais, em centímetros cúbicos;

e_i = é o índice de vazios inicial do corpo de prova;

ρ_s = é a massa específica dos grãos, em gramas por centímetro cúbico;

S_r = é o grau de saturação inicial do corpo de prova, em percentagem

ρ_w = é a massa específica da água , tomada igual a 1g/cm³

Cálculo do coeficiente de permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade (k), e calculado de acordo conforme a Equação 2.9:

$$k = \frac{aH}{A\Delta t} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (2.9)$$

Onde:

k= é o coeficiente de permeabilidade, expresso de forma exponencial (base 10) com dois algarismos significativos, em centímetros por segundo ;

Δt = Dado pela diferença entre os instantes t_2 e t_1 , (s);

H_1 = carga hidráulica no instante t_1 , (cm);

H_2 = carga hidráulica no instante t_2 , (cm)

a= área interna da bureta de vidro, (cm²);

A= área inicial do corpo de prova, (cm²);

H= altura inicial do corpo de prova, (cm)

2.1.3.2 Ensaio de infiltração

2.1.3.2.1 Método dos cilindros concêntricos

Método utilizado para determinar a infiltração da água no solo, e um processo dinâmico de penetração vertical através da superfície do solo, para conhecimento da taxa de infiltração da água (NUNES et al., 2012)

Os materiais necessários para execução dos ensaios são, cilindro metálico de 3 mm de espessura, com diâmetro de 30 cm e altura de 30 cm, biselado numa das bordas, outro cilindro metálico de 3 mm de espessura, com diâmetro mínimo de 50 cm e altura de 30 cm, biselado numa das bordas, uma placa metálica redonda de 1 cm de espessura e 54 cm de diâmetro, provida de reforço de ferro no centro, régua graduada, com flutuador, para indicar o nível de água no cilindro interno, cronometro para registro dos tempos, um recipiente para levar água

(pode ser um tambor de 200 litros), marreta para cravar os cilindros, lona plástica de 1 m² e folha de dados.

2.1.3.2.1 Procedimentos dos ensaios

- a) Colocar o cilindro maior (diâmetro de 50 cm) sobre a superfície do solo e pressioná-lo para que penetre um pouco nele.
- b) Colocar sobre o cilindro a chapa metálica redonda de 1 cm de espessura e 54 cm de diâmetro.
- c) Golpear a chapa com marreta, para que o cilindro penetre cerca de 10 cm no solo – cuidar para que o cilindro penetre verticalmente no solo. Se isso não ocorrer, a verticalidade não pode ser ocorrida, neste caso, retirar o cilindro e instalá-lo em outro local.
- d) Instalar o cilindro menor (diâmetro de 30 cm) por dentro do maior, de forma concêntrica, seguindo o procedimento igual ao descrito anteriormente.
- e) Instalados os cilindros, coletar amostras para determinar a umidade gravimétrica.
- f) Colocar a lona de plástico no interior do cilindro interno, ajustando-a bem ao solo e a parede do cilindro.
- g) Introduzir água no cilindro interno; como ele está recoberto internamente com a lona plástica, não há infiltração de água no solo. A água deve ser adicionada até que se forme uma lamina, no interior do cilindro de, aproximadamente 7,5 cm de espessura.
- h) Instalar a régua graduada, com flutuador, no cilindro interno.
- i) Ler o posicionamento do nível de água na régua graduada provida de flutuador, e registrar o valor na folha de dados (esta leitura corresponderá ao tempo zero, isto é, ao instante inicial da contagem de tempo).
- j) Introduzir água no espaço existente entre os cilindros externo e interno, até que se forme uma lamina de aproximadamente 5 cm de espessura. Deve-se manter o cilindro infiltrômetro (cilindro interno) rodeado de água, para evitar que a água nele contida adquira, por ocasião de sua infiltração (depois da retirada da lona plástica protetora), movimento horizontal no solo, isto é, fuga lateral por baixo do cilindro, acarretando erro na determinação da taxa de infiltração.
- k) 11. Retirar a lona plástica do cilindro interno e acionar o cronômetro imediatamente início da marcação do tempo de infiltração, isto é, instante inicial $t_0 = 0$.

- l) Com auxílio da régua graduada provida de flutuador, ler o posicionamento do nível de água (h) aos 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos a contar do instante zero, e após se for preciso, continuar com a leitura com intervalos de uma hora, até que a velocidade de entrada de água no solo seja quase constante. Registrar os valores na folha de dados.
- m) Quando, na sequência de leituras (nos tempos indicados), se constatar que o nível de água no interior do cilindro interno baixou mais ou menos 5 cm, adicionar imediata e cuidadosamente, água naquele cilindro, até recompor o nível inicial aproximadamente. Completa a adição de água, medir em seguida, com o auxílio da régua graduada provida de flutuador, o novo posicionamento do nível de água (h') no cilindro interno e registrar na folha de dados, na linha correspondente ao instante que a água for acrescentada (mesmo instante de leitura da leitura anterior)
- n) Quando, na sequência de leituras (nos tempos indicados), se constatar que o nível de água no interior do cilindro interno baixou mais ou menos 5 cm, adicionar imediata e cuidadosamente, água naquele cilindro, até recompor o nível inicial aproximadamente. Completa a adição de água, medir em seguida, com o auxílio da régua graduada provida de flutuador, o novo posicionamento do nível de água (h') no cilindro interno e registrar na folha de dados, na linha correspondente ao instante que a água for acrescentada (mesmo instante de leitura da leitura anterior)
- o) Com os dados obtidos em campo calcular e registrar os demais valores da folha de dados, conforme discriminado a seguir:
- p) Determinar a lâmina de água infiltrada (.h), em centímetros, dentro de cada intervalo de tempo, pela diferença entre valores sequenciais de h, isto é, $.h = h_i - h_{i-1}$. Obs.: Quando houver recomposição de nível de água no cilindro interno, substituir, no subseqüente cálculo de h, o valor de h_{i-1} da expressão anterior pelo correspondente valor de $h'_i - 1$, onde $h'_i - 1$ é a leitura do nível da água recomposto.
- q) Determinar o intervalo de tempo (Δt), em minutos, entre leituras consecutivas, pela diferença entre valores sequenciais de t, isto é, $t = t_i - t_{i-1}$.
- r) Calcular a taxa de infiltração média, em centímetros por hora, em cada intervalo de tempo, pela expressão $\times 60$.
- s) Calcular a lâmina de água infiltrada, em centímetros por hora, até cada Instante considerado (lâmina acumulada), pela expressão $\Sigma \Delta h$.

CAPÍTULO 3

3.1 METODOLOGIA

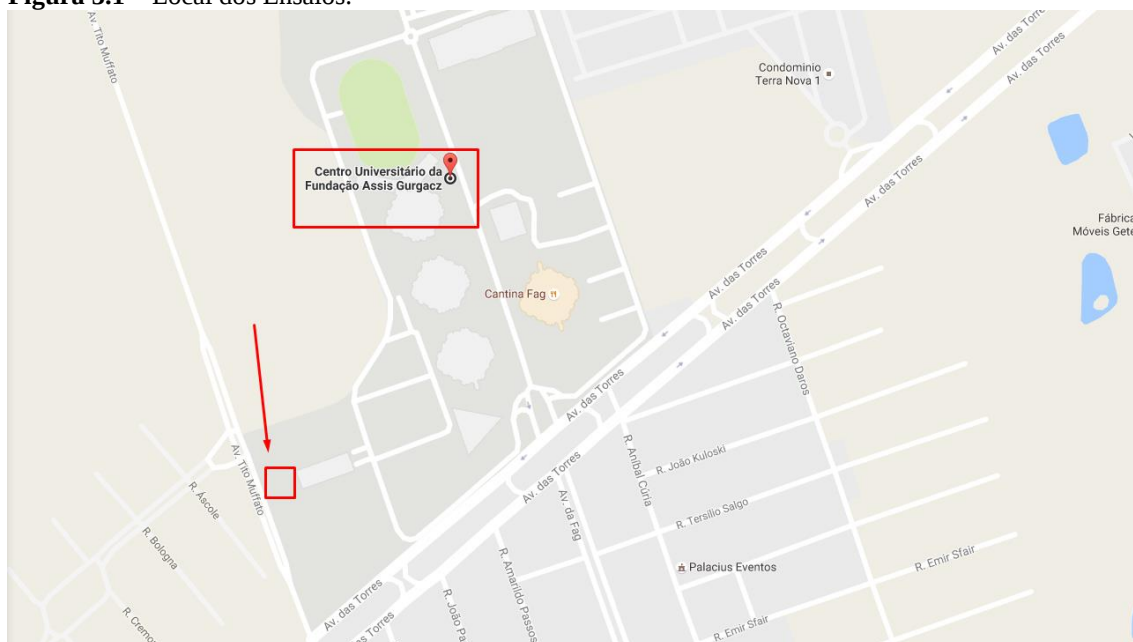
3.1.1 Especificações da pesquisa e localização do solo estudado

Trata-se de uma pesquisa quantitativa que aborda a análise da permeabilidade do solo, através de 6 amostras indeformadas coletadas e conduzidas ao laboratório de mecânica dos solos do Centro Universitário Assis Gurgacz para realização dos procedimentos de ensaio estabelecidos pela NBR 14545/2000 (Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável).

Estes ensaios foram aplicados em três cotas do terreno estudado, sendo -2, -8 e -15 metros, com o intuito de conhecer os valores médios de permeabilidade, para os ensaios diretos que foram realizados em laboratório.

O local de estudo será o Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz, situada em Cascavel – PR, conforme Figura 3.1

Figura 3.1 – Local dos Ensaios.



Fonte: Google Maps, 2016.

3.1.2 Caracterização do solo local

De acordo com RADOLL (2014) O solo de cascavel é classificado como siltoso e argiloso inorgânico com características colapsáveis que são comuns em solo laterítico, um resumo dos valores médios na caracterização física das amostras podem ser observados na Tabela 3.1

Tabela 3.1 – Valores médios por camadas

VALORES MÉDIOS	CAMADA 1	CAMADA 2
	1m a 9m	10m a 15m
Teor de umidade(%)	38,96%	58,04%
Limite de liquidez (%)	53,11	59,00
Limite de plasticidade(%)	38,22	42,00
Índice de plasticidade(%)	14,89	17,33
Argila (%)	70,07%	56,47%
Silte (%)	25,26%	34,63%
Areia (%)	4,67%	8,90%
Pedregulho (%)	0,00%	0,00%
Massa Específica dos Sólidos (kN/m³)	26,69	27,05
Consistência	Muito mole a média	Rija a Dura
Peso específico natural (kN/m³)	16,68	16,16
Índice de vazios (e)	1,22	1,66

Fonte: ZEN, 2016.

De acordo com ZEN (2016), as profundidades tem características predominantes como silte argiloso arenoso, já na classificação do solo conforme o Sistema Unificado de Classificação dos Solos SUCS, as camadas de solo apresentados na Tabela 3.1, são classificados como CH (solos argilosos muito compressíveis, também podendo ser classificado pelo Sistema de classificação rodoviário (T.B.R) como A-7-6, que o descreve sendo uma argila siltosa medianamente plástica com pouco ou nenhum material grosso, que contem em sua constituição material com elevado índice de plasticidade em relação ao limite de liquides, estando sujeito a elevadas mudanças de volume.

3.1.3 Coleta das amostras e realização dos furos de sondagem

Foi aberto 1 poço de inspeção com diâmetro de 1m para a extração das amostras indeformadas em três cotas, um furo na cota -1 metro e outro furo na cota -10 e -15 metros para retirada do subsolo com auxílio de uma camisa metálica conforme apresentado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Camisa metálica sendo cravada no solo



Fonte: Autor, 2016

A amostra foi removida desta camisa metálica com a utilização de um extrator de amostras conforme a Figura 3.3.

Figura 3.3 – Esquema montado para extração da amostra



Fonte: Autor, 2016

Estes estas cotas foram definidas a fim de comparar que como outro estudo estava conduzido com ensaios de permeabilidade em campo, por Figueiredo (2016), nas mesmas cotas, assim como a alteração de resistência do solo e de sua consistência, da transição da camada 1 para a camada 2, por isso optou-se por uma cota de maior profundidade para ver possíveis variações do coeficiente ao longo da profundidade.

3.1.4 Tipo de ensaio de permeabilidade

O ensaio adotado foi o de permeabilidade de solos argilosos à carga variável com base na NBR 14545/00, pois o solo que foi estudado é do tipo argiloso, além de que o equipamento disponível para realização dos ensaios era o permeâmetro do método B contido na NBR 14545/00

De acordo com Santos (2010), os ensaios desse gênero aplicam-se a solos com condutividade hidráulica média/baixa, a partir de estudos realizados em laboratórios com amostras retiradas em campo.

Para análise da permeabilidade do solo neste método, foram retiradas 6 amostras

indeformadas do solo em estudo e levadas a laboratório para execução dos procedimentos de ensaio normatizados.

3.1.5 Equipamentos utilizados

- Permeâmetro do Método B da Figura 3.4, padronizado de acordo com a NBR 14545. O Permeâmetro é constituído por um cilindro metálico com dimensões internas na ordem de 15 cm de diâmetro e 18 cm de altura, acoplado a duas tampas, além de um orifício que permite na fase de saturação do corpo de prova a entrada de água e na fase de leitura a sua saída.

Figura 3.4 – Permeâmetro do Método B.



Fonte: Autor, 2016

- Bureta de vidro graduada em décimos de centímetros, utilizada para medição e aplicação das cargas hidráulicas, formando junto ao permeâmetro o conjunto indicado pela NBR 14545/00;
- Areia grossa para ser empregada como material filtro no topo e na base do corpo de prova;
- Argila do tipo bentonita para isolar as laterais do corpo de prova e impedir que a água encontre passagem pelas laterais do Permeâmetro;
- Extrator de amostra, como a amostra é do tipo indeformada e retirada do subsolo com

auxílio de uma camisa metálica, a amostra deve ser removida do molde com auxílio de um extrator;

- Equipamento para talhagem do corpo de prova com a dimensões desejadas, serão utilizadas uma faca e uma régua metálica biselada para dar acabamento;
- Instrumentos para medição do corpo de prova, serão necessários paquímetro, para medir altura e diâmetro, com resolução de 0,1mm;
- Balanças que permitam pesar nominalmente 200g e 1500g em resoluções de 0,01g e 0,1g, respectivamente, e sensibilidades compatíveis;
- Termômetro com resolução de 0,1°C;
- Cronometro com indicação de segundo;
- Água percolante, que será utilizada para fluir no corpo de prova;

3.1.6 Procedimentos dos ensaios de acordo com o método B da NBR 14545/00

Antes de se iniciar a saturação do corpo de prova e interessante garantir as dimensões medias impostas pela NBR 14545/00, talhando do corpo de prova com aproximadamente 10 centímetros de diâmetro e 10 centímetros de altura, feito isso, aplicou-se cuidadosamente parafina nas laterais do corpo de prova com o auxílio de um pincel conforme Figura 3.5, isto visa não possibilitar “fuga” de água pelas laterais do corpo de prova e que toda a água percole de cima para baixo no corpo de prova e passe por todo ele, e também aplicou-se uma camada fina de parafina nas bordas superiores, a fim de garantir a integridade física do corpo de prova durante a aplicação da argila bentonita nas laterais do permeâmetro.

Figura 3.5 – Corpo de prova parafinado.



Fonte: Autor 2016.

A base do Permeâmetro foi preparada colocando-se na tampa inferior uma tela de arame com malha de abertura 2mm e, sobre ela, uma camada de areia grossa com espessura da ordem de 1cm, além disso, foi utilizado manta geotêxtil do tipo tecido, para ser utilizada com função de filtro impedindo a saída ou entrada de finos que ocasionalmente poderiam impedir a percolação de água, após isso, foi colocado na parte inferior e superior um anel feito de material polimérico para evitar o seu contato com a argila plástica, que envolvera o corpo de prova; em seguida, foi acoplado o cilindro metálico a base preparada, feito isso foi posicionado o corpo de prova no centro do cilindro.

A argila do tipo bentonita, teve de ser colocada em camadas da ordem de 2cm de altura, compactando-se as mãos, cuidando na aplicação ideal de força, pois caso se aplique muita pressão na argila, ela começa a entrar em baixo da amostra, levantando-a, e se for feito com pouca aplicação de força, não irá garantir que o corpo esteja totalmente confinado e com as laterais impermeabilizadas, vale salientar também, que é interessante o cuidado com a preparação da própria argila, deixando-a com pouca umidade, para garantir que consiga fixar

nas laterais do permeâmetro, pois se estiver muito úmida ela não consegue ter aderência suficiente para impermeabilizar o mesmo a fim de evitar o aparecimento de caminhos preferenciais entre as paredes do cilindro e do corpo de prova, conforme Figura 3.6.

Figura 3.6 – Corpo de prova posicionado no centro do Permeâmetro.



Fonte: Autor 2016.

A argila do tipo bentonita, teve de ser colocada em camadas da ordem de 2cm de altura, compactando-se as mãos, cuidando na aplicação ideal de força, pois caso se aplique muita pressão na argila, ela começa a entrar em baixo da amostra, levantando-a, e se for feito com pouca aplicação de força, não irá garantir que o corpo esteja totalmente confinado e com as laterais impermeabilizadas, vale salientar também, que é interessante o cuidado com a preparação da própria argila, deixando-a com pouca umidade, para garantir que consiga fixar nas laterais do permeâmetro, pois se estiver muito úmida ela não consegue ter aderência suficiente para impermeabilizar o mesmo a fim de evitar o aparecimento de caminhos preferenciais entre as paredes do cilindro e do corpo de prova.

Colocou-se um anel feito de material polimérico cobrindo o topo da argila circundante ao corpo de prova para impedir o contato da argila com a areia e outros filtros utilizados, conforme figura 3.7.

Figura 3.7 – Corpo de prova isolado pela argila bentonita.



Fonte: Autor 2016.

Logo acima do anel foi feita colocação da manta geotêxtil para ajudar a filtrar e impedir que escapem os finos da amostra, preencheu-se o restante da altura do cilindro com areia grossa e fechou-se o conjunto com a tampa superior, como disposto na Figura 3.8.

Figura 3.8– Permeâmetro pronto a ser fechado



Fonte: Autor 2016.

Após a montagem do corpo de, iniciou-se a saturação por meio de percolação no sentido ascendente, efetuada pelo orifício localizado na tampa inferior, até que ocorra surgimento de água no orifício localizado na tampa superior e a percolação se processar sem a presença de bolhas de ar, percolando após o surgimento da água no orifício superior, aguardou-se mais 12 horas para garantir a saturação.

Com o corpo de prova devidamente saturado, o sistema de aplicação e medição de cargas hidráulicas foi conectado ao orifício localizado na tampa superior para início dos tempos de ensaio, conforme demonstrado na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Permeâmetro em funcionamento.



Fonte: Autor 2016.

Com o sistema de ensaio devidamente preparado e saturado, foram iniciadas as contagens de cinco tempos de 1 minuto até o acumulado de 10 minutos, anotando-se o tempo decorrido, t_1 e t_2 (em segundos), durante o ensaio, e os valores das cargas hidráulicas, h_1 e h_2 (em centímetros), estas que são observadas na bureta graduada que fica alocada no orifício superior do permeâmetro, sendo estes valores aplicados no cálculo do coeficiente de permeabilidade, sendo que estes valores devem ser relativamente próximos, não apresentando tendências evidentes, de crescimento ou de diminuição.

3.2 Cálculo do coeficiente de permeabilidade

Com os valores de tempo e carga hidráulica obtidos nos ensaios em laboratório é calculado o coeficiente de permeabilidade (k), de acordo conforme a Equação 3.1:

$$k = \frac{aH}{A\Delta t} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (3.1)$$

Onde:

k = é o coeficiente de permeabilidade, expresso de forma exponencial (base 10) com dois algarismos significativos, em centímetros por segundo ;

Δt = Dado pela diferença entre os instantes t_2 e t_1 , (s);

H_1 = carga hidráulica no instante t_1 , (cm);

H_2 = carga hidráulica no instante t_2 , (cm)

a = área interna da bureta de vidro, (cm²);

A = área inicial do corpo de prova, (cm²);

H = altura inicial do corpo de prova, (cm)

CAPÍTULO 4

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1.2 Coeficiente de permeabilidade

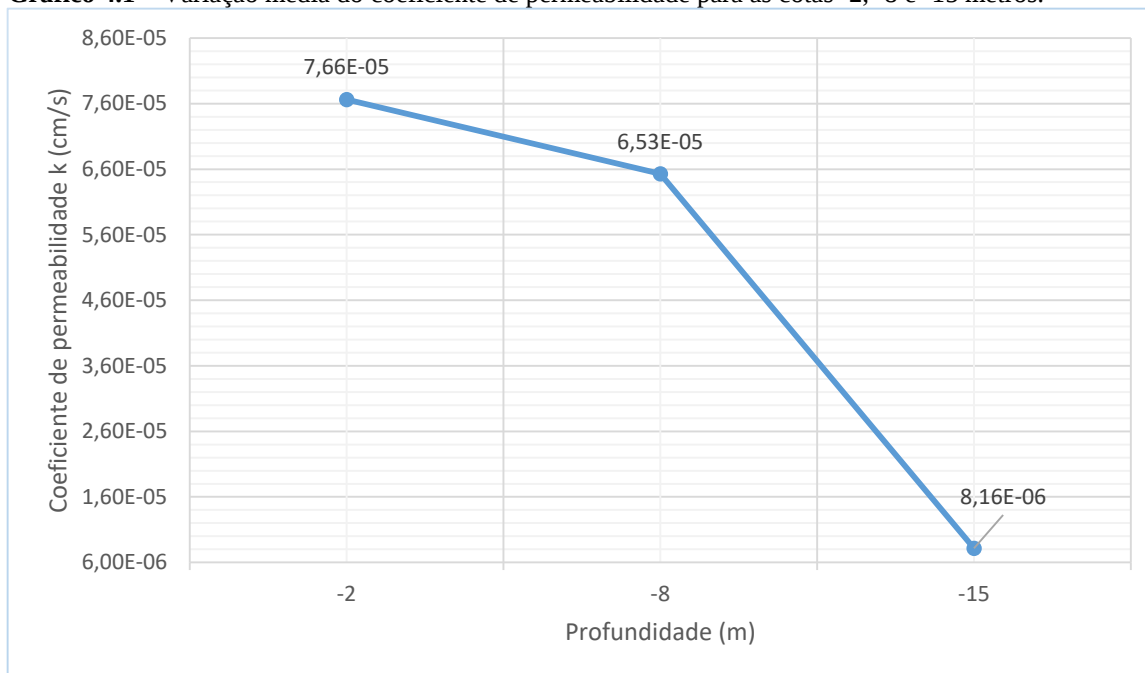
Com os ensaios realizados em laboratório, foram possíveis obter os valores do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos através de carga variável, para as cotas -2, -8 e -15 metros, conforme apresentado na Tabela 4.1, além disso o Gráfico 4.1 aponta uma variação de cerca de 10 vezes no valor do coeficiente de permeabilidade da amostra da cota -2 para a amostra da cota -15, tendo em conta que o índice de vazios do solo superficial tende a ser maior que o do subsolo devido a tensão que o solo está submetido, existem alguns outros fatores que fazem parte das características dos grãos do solo, que tem influência direta no seu coeficiente k , e SANTOS (2010), afirma que solos com granulometrias finas apresentam valores de coeficiente menores que os compostos por areias e pedregulhos, além disso, BUENO e VILAR (1979), complementam que outras características do solo também influenciam nos valores de permeabilidade, sendo índice de vazios, sua estrutura, grau de saturação e o tamanho de suas partículas.

Tabela 4.1 – Valores dos coeficientes de permeabilidade

Cota	Amostra	Valor de k
-2m	1	$7,52 \times 10^{-5}$ cm/s
-2m	2	$7,79 \times 10^{-5}$ cm/s
-8m	1	$6,05 \times 10^{-5}$ cm/s
-8m	2	$6,45 \times 10^{-5}$ cm/s
-15m	1	$8,79 \times 10^{-6}$ cm/s
-15m	2	$7,53 \times 10^{-6}$ cm/s

Fonte: Autor, 2016

Gráfico 4.1 – Variação média do coeficiente de permeabilidade para as cotas -2, -8 e -15 metros.



Fonte: Autor, 2016.

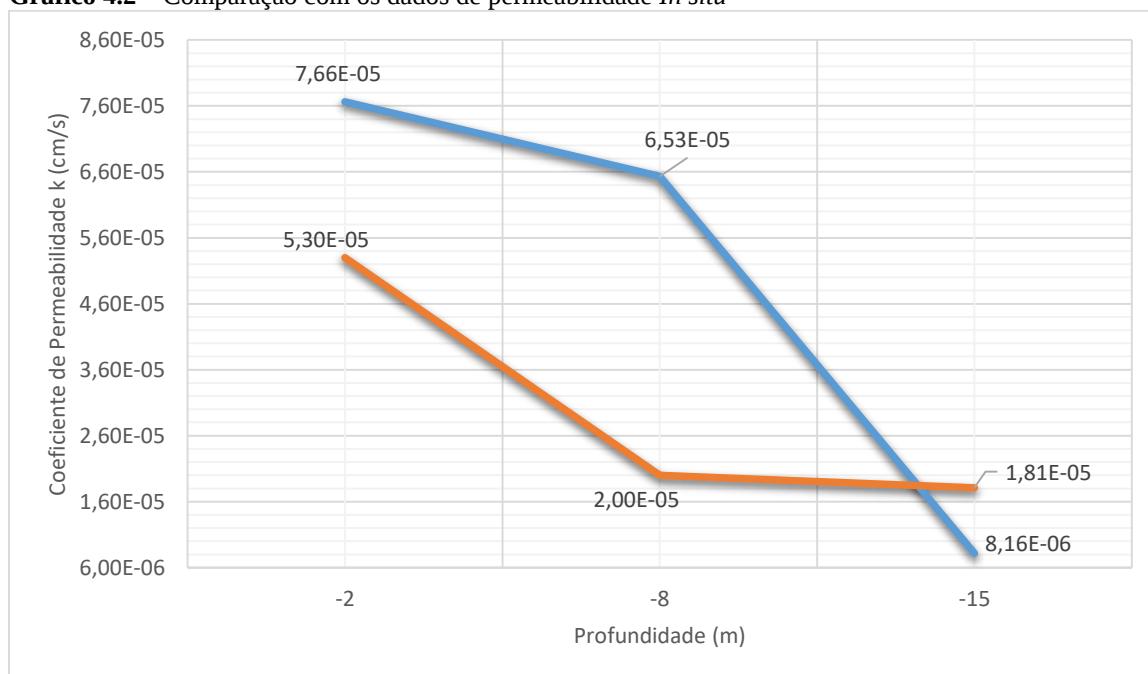
A partir da Tabela 4.1, pode se obter o valor médio para k de $7,6644 \times 10^{-5}$ cm/s para a cota -2m, resultado no qual não houve variação tão significativa em relação a cota -8, que atingiu um valor de k de $6,2568 \times 10^{-5}$ cm/s, conforme apresentado no Gráfico 4.1. Esta baixa diferença no coeficiente de permeabilidade também se dá devido os solos terem características semelhantes além de ser a mesma camada, conforme o laudo de sondagem presente no Anexo 2, foi descrito como argila siltosa marrom avermelhada, muito mole a média.

Analizando a cota de maior profundidade, -15m, onde o solo se encontra bastante compactado devido as pressões aplicadas pelo próprio solo, pela pressão neutra e mudança de camada, e também houve a alteração das características de consistência do solo, que passa de mole a média para rija a dura, e por conta disso, houve grande variação deste coeficiente, obtendo então, um valor médio de k , que era de $6,531 \times 10^{-5}$ para a cota -8, reduziu sua permeabilidade para $8,1618 \times 10^{-6}$ cm/s na cota -15.

Comparando os valores obtidos nos ensaios, com valores bibliográficos, referente a ordem de grandeza para os coeficientes de permeabilidade, o solo em questão se enquadra no tipo Silte, que fica entre 10^{-5} a 10^{-7} cm/s, ou seja com grau de permeabilidade Baixa, para caracterização do grau de permeabilidade dos solos segundo seus coeficientes de permeabilidade considerando o funcionamento de sumidouros de água pluvial (Lambe e Whitman, 1976 *apud* Neto, 2007).

Figueiredo (2016) afirma que esta variação ocorre em devido da área de influência dos furos ensaiados. A altura da coluna d'água (h) atuante nos ensaios do furo com 15 metros era quatorze vezes maior do que a atuante no furo de 2 metros de profundidade, razão pela qual foi desconsiderado 1 metro do tubo de acoplamento para aplicação destes valores para o cálculo. Como se tratam de valores inversamente proporcionais, observou-se a influência da altura da coluna d'água (h) nos valores resultantes. Contudo, pode se perceber um aumento no coeficiente de permeabilidade em relação ao estudo em laboratório, conforme apresentado no Gráfico 4.2, este que ocorre pela diferença nos métodos.

Gráfico 4.2 – Comparação com os dados de permeabilidade *In situ*



Fonte: Autor, 2016.

Os valores obtidos por Pazzeto (2009), que contém dados relativamente parecidos com o que foi analisado, presente no estado de Santa Catarina, também sendo definido como solo do tipo silte-argiloso, apresenta na cota -0,3m, um coeficiente de permeabilidade na ordem de $1,06 \times 10^{-5}$ cm/s.

Considerando o estudo realizado por Diemer (2008), cujo solo é residual da região de Ijuí-RS é de basalto, composta em sua maioria em argila, cerca de 85%. Obteve-se os valores de permeabilidade de aproximadamente $1,91 \times 10^{-5}$ cm/s para amostras no estado natural, este valor se dá devido grande taxa de argila presente na composição do solo.

Dentre as correlações indiretas proposta por Hazen, é aplicada para estabelecer estimativas pouco precisas da permeabilidade (k) para solos arenosos, com o valor do diâmetro efetivo entre 0,1 e 3 mm e coeficiente de uniformidade inferior a 5 (MELLO e TEIXEIRA, 1967), podendo ser aplicado em alguns casos para solos lateríticos, utilizando o diâmetro efetivo expresso pelo valor de d_{10} encontrado na curva granulométrica conforme o Gráfico 4.3 apresentada por ZEN (2016), que realizou ensaios no CEEF da FAG, analisando o gráfico obteve-se o valor para o coeficiente de permeabilidade por volta de 4×10^{-4} cm/s, valor não muito confiável pois serve apenas para gerar uma estimativa.

No estudo realizado por Sampaio (2004), obteve-se valores de condutividade hidráulica na ordem de 10^{-5} , solo composto em sua maioria por material arenoso, e com forte influência de pedras e raízes na amostra, valores que de acordo com ele influenciam positivamente na permeabilidade

CAPÍTULO 5

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do presente estudo tendo como objetivo através de ensaios laboratoriais, realizar uma análise mais aprofundada de como a água se comporta na percolação do solo ao longo da profundidade do solo argiloso, do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz, da cidade de Cascavel-PR, no qual foram obtidos com sucesso valores médios referentes ao coeficiente de permeabilidade, onde foram duas camadas de solo analisadas ao longo da profundidade.

Quanto a permeabilidade propriamente dita, percebe-se uma variação significativa quando se é analisada cotas mais profundas, e seguem os critérios retratados por Caputo (1996), no qual a permeabilidade é expressa como um coeficiente que tem transições decrescentes conforme prossegue o estudo da profundidade, tendo em conta que o índice de vazios do solo superficial tende a ser maior que o do subsolo devido a tensão que o solo está submetido.

Além disso os resultados obtidos mantiveram os padrões característicos apresentados em literaturas, onde o solo estudado é caracterizado como argiloso com porções de silte, classificados com grau de permeabilidade muito baixa, conforme estudos realizados por Pinto (2006), dados estes encontrados entre 10^{-5} cm/s e 10^{-6} cm/s, valores estes que são consideráveis

aceitáveis para sistemas que desejam conter resíduos de efluentes de esgoto domésticos, através de lagoas de estabilização que é de 10^{-7} a 10^{-6} (PAZZETO, 2009).

Contudo, o estudo da permeabilidade ao longo da profundidade demonstrou-se bastante satisfatório, pois os valores encontrados, não poderiam ser traçados se fossem realizados em apenas uma cota de profundidade, valores estes, podendo serem aplicados em diversas obras de estruturas hidráulicas na cidade de Cascavel-PR.

CAPÍTULO 6

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Análise da permeabilidade NBR 14545/2000 método B com corpos de prova compactados

Estudo da condutividade hidráulica considerando outros fluidos, como esgoto, água de chuva para sumidouros.

Estudo da condutividade hidráulica do solo com adições de outros compostos, como borracha de pneu, cinza de casca de arroz, material pozolânico, para impermeabilizações.

Ensaio de infiltração do solo para implantação de sumidouros, conforme NBR 7229/93

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545:** Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 13292:** Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 6122:** Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010.

BUENO, B. S.; VILAR, O.M. **Mecânica dos solos**. São Carlos: EESC-USP, São Carlos-SP, 1979.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**. Volumes 1. Editora: LTC. Rio de Janeiro-RJ, 1996.

COSTA, L. D. – **Determinação da eficiência do ensaio SPT através de prova de carga estática sobre amostrador padrão**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade Assis Gurgacz – Graduação em Engenharia Civil – Cascavel-PR, 2014.

DIEMER, F. **Estudo da permeabilidade do solo da região de Ijuí – RS percolando água e óleo diesel** Trabalho de conclusão de curso. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI. Ijuí. 2008, 17p.

GUTIERREZ, N. H. M. **Influências de aspectos estruturais no colapso de solos do norte do Paraná**. Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – Doutorado em Geotecnia – São Carlos-SP, 2005.

MARTINS, S.G. et al. **Avaliação de atributos físicos de um latossolo vermelho distroférrico sob diferentes povoamentos florestais**. Revista Cerne, Lavras, v.8,

NEVES, M. **Estudo da permeabilidade do solo colapsível da região de São Carlos**. 1987. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, São Carlos.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Ed. Villibor, 1995.

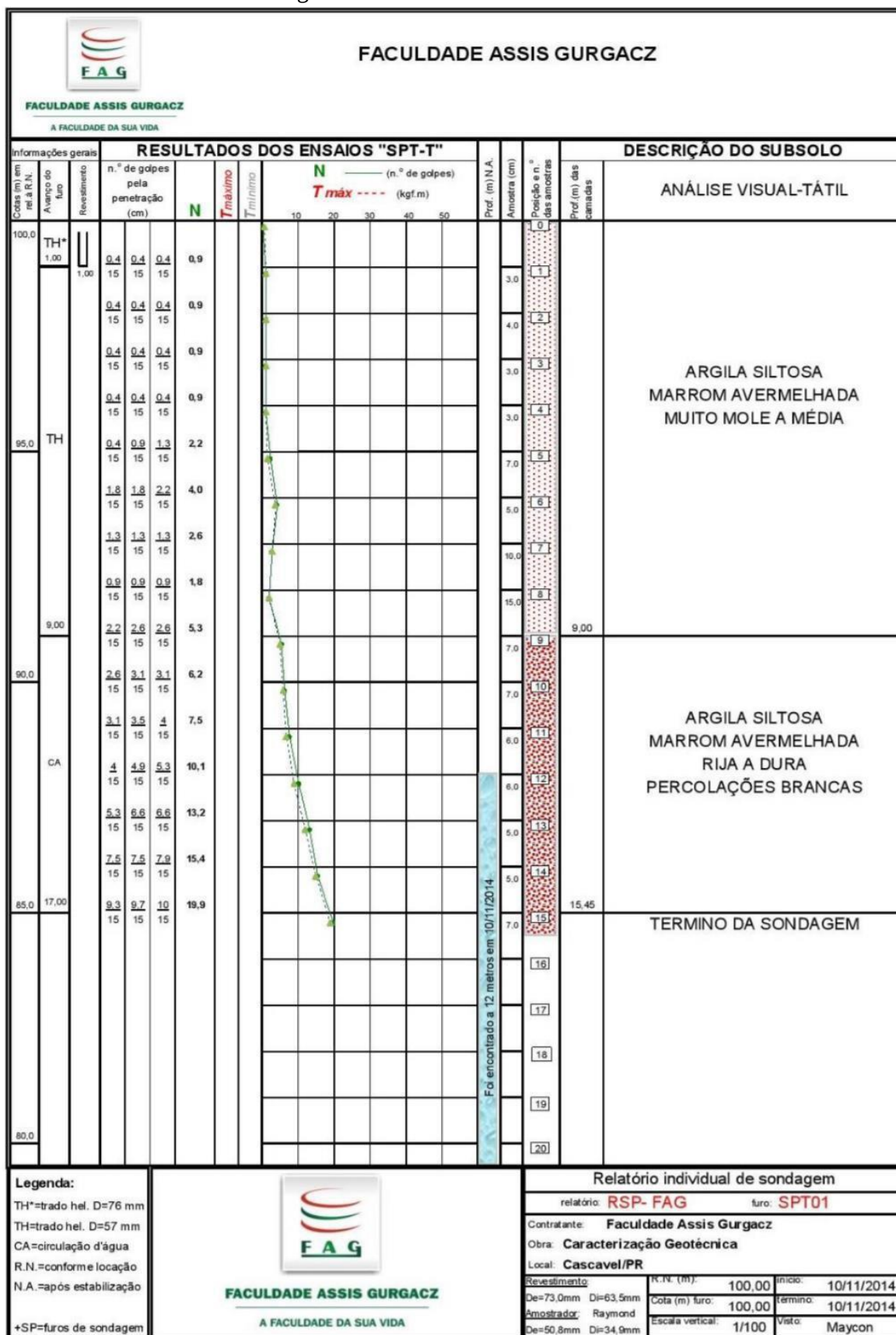
PAZZETO, M.G. **Estudo da permeabilidade de solos argilosos disponíveis para recuperação de áreas degradadas**. Trabalho de conclusão de curso no curso de Engenharia Civil, da Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC. – Criciúma –SC, 2009.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

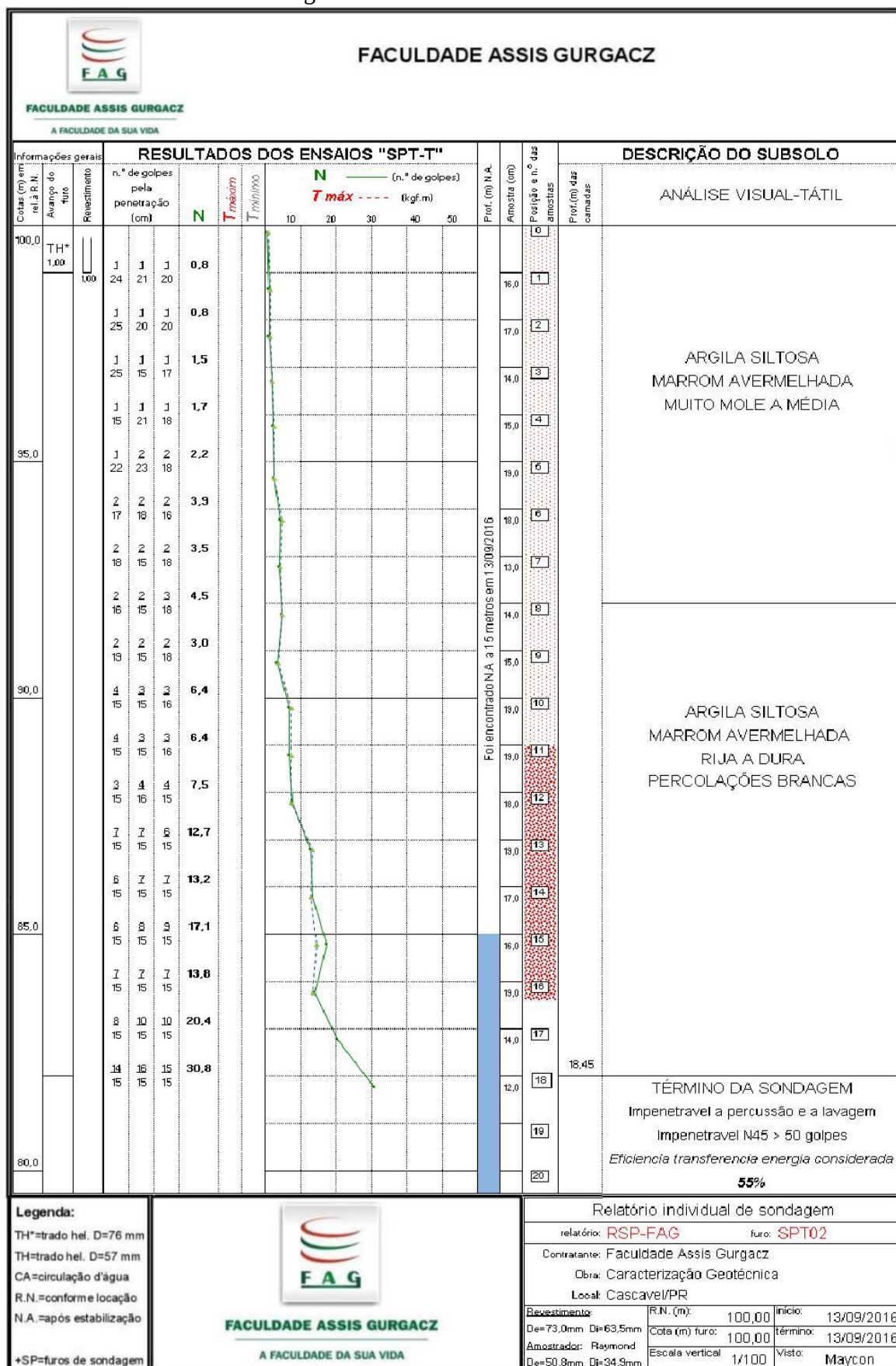
RIBEIRO, R. A. V. **Avaliação do desempenho hidráulico de barreiras de proteção ambiental produzidas com solos laterítico arenoso compactado, estabilizado quimicamente**. Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista – Mestrado em Engenharia Civil – Ilha Solteira-SP, 2002.

SAMPAIO, F. M. T. **Permeabilidade superficial de solos da sub-bacia do córrego centenário da cidade de Lavras-MG**. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras – Mestrado em Engenharia Agrícola – Lavras-MG, 2004.

SANTOS, G. S. **Estudo da permeabilidade em barreiras de impermeabilização**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual de Feira de Santana – Graduação em Engenharia Civil – Feira de Santana-BA, 2010.



ANEXO 02– Laudo de sondagem realizado no solo do Centro Universitário FAG



**CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
VILMAR FIGUEIREDO DA SILVA**

**DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE *IN SITU* AO
LONGO DA PROFUNDIDADE DO SOLO COLAPSÍVEL DO CAMPO
EXPERIMENTAL DE ENGENHARIA DO CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS
GURGACZ EM CASCAVEL-PR**

**CASCAVEL - PR
2016**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
VILMAR FIGUEIREDO DA SILVA**

**DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE *IN SITU* AO
LONGO DA PROFUNDIDADE DO SOLO COLAPSÍVEL DO CAMPO
EXPERIMENTAL DE ENGENHARIA DO CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS
GURGACZ EM CASCAVEL-PR**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Civil, do Centro universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Professor Orientador Me.Eng. Civil Maycon
André de Almeida**

**CASCAVEL - PR
2016**

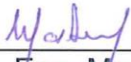
CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

VILMAR FIGUEIREDO DA SILVA

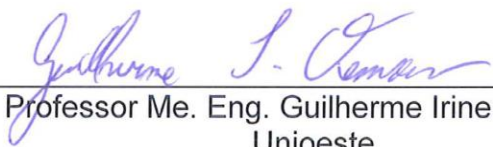
**DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE *IN SITU* AO
LONGO DA PROFUNDIDADE DO SOLO LATERÍTICO DO CAMPO
EXPERIMENTAL DE ENGENHARIA DO CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS
GURGACZ EM CASCAVEL-PR**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob orientação do Professor Me. Eng. Maycon André de Almeida.

BANCA EXAMINADORA



Orientador Prof^a. Me. Eng. Maycon André de Almeida
Centro Universitário FAG
Engenheiro Civil



Professor Me. Eng. Guilherme Irineu Venson
Unioeste
Engenheiro Civil



Professor Esp. Lincoln Salgado
Centro Universitário FAG
Engenheiro Civil

Cascavel, 11 de Novembro de 2016

RESUMO

Em âmbito genérico, todas as obras de Engenharia Civil são consolidadas sobre terrenos cujas quais necessitam que os comportamentos do solo sejam devidamente considerados. Características hidrogenéticas do solo como a variação do índice de vazios e o estudo da permeabilidade, são alguns dos fatores influentes quanto a estes comportamentos naturais que o solo pode apresentar com o emprego de obras de engenharia. Os estudos de percolação de água são de importância significativa devido a sua intervenção em alguns problemas práticos de engenharia como por exemplo, na quantificação estimada de água que infiltra em uma obra de escavação ou no estudo de recalques relacionados a diminuição do índice de vazios que ocorrem a partir da evasão de água através desses vazios. Diante disso, este trabalho tem o intuito de analisar uma propriedade do solo que permite o escoamento de água através dele, denominada permeabilidade. Uma metodologia normatizada foi aplicada para a realização de estudos experimentais compostos por ensaios de permeabilidade realizados *in situ* que permitiram a realização de uma análise ao longo da profundidade do solo do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz em Cascavel-PR, obtendo características físicas e hidrogenéticas das variações do coeficiente de permeabilidade ao longo da profundidade do solo local. Os dados resultantes foram comparados com outros valores de solos semelhantes e também com valores coeficiente de permeabilidade tipicamente apresentados em bibliografias que abordam o mesmo assunto, proporcionando assim, a caracterização de um valor médio de permeabilidade para o solo estudado. Com a obtenção de um valor médio na ordem de 10^{-5} cm/s, conclui-se que resultados obtidos mantiveram os valores característicos revisados em literaturas que tratam de valores correspondentes à solos compostos por porções de argila e silte.

Palavras-chaves: Coeficiente de permeabilidade; Ensaios; Características do solo; Índice de vazios.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Perfil comum de intemperização de rochas ígneas.	15
Figura 2.2: Ensaio de permeabilidade com carga consatante	23
Figura 2.3: Ensaio de permeabilidade com carga variável	24
Figura 2.4: Ensaio de rebaixamento em sondagens abaixo do nível d'água	28
Figura 2.5: Ensaio de permeabilidade por bombeamento	29
Figura 2.6: Ensaio de rebaixamento em sondagens abaixo do nível d'água	30
Figura 2.7: Ensaio de recuperação em sondagens abaixo do nível d'água.....	31
Figura 3.1: Local dos ensaios	33
Figura 3.2: Disposição dos furos no local dos ensaios	34
Figura 3.3: Detalhe do tudo acoplado no furo	35
Figura 3.4: Ábaco para obtenção do coeficiente de condutividade	38

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1: Valores das vazões obtidas no furo de sondagem com 15 metros de profundidade.	40
Gráfico 4.2: Valores das vazões obtidas no furo de sondagem com 8 metros de profundidade.	40
Gráfico 4.3: Valores das vazões obtidas no furo de sondagem com 2 metros de profundidade.	41
Gráfico 4.4: Valores dos coeficientes de permeabilidade obtidos no furo de sondagem com 15 metros de profundidade.	42
Gráfico 4.5: Valores dos coeficientes de permeabilidade obtidos no furo de sondagem com 8 metros de profundidade.	43
Gráfico 4.6: Valores dos coeficientes de permeabilidade obtido no furo de sondagem com 2 metros de profundidade.	43
Gráfico 4.7: Variação do coeficiente de permeabilidade dos furos de sondagem com 15 e 8 metros de profundidade.	44
Gráfico 4.8: Variação do coeficiente de permeabilidade dos furos de sondagem com 15, 8 e 2 metros de profundidade.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Limites das frações de solo pelo tamanho dos grãos.	16
Tabela 2.2: Valores típicos como ordem de grandeza para o coeficiente de permeabilidade. 21	
Tabela 2.3: Caracterização do grau de permeabilidade dos solos segundo seus coeficientes de permeabilidade, considerando o funcionamento de sumidouros de água pluvial e drenagem .21	
Tabela 2.4: Tipos de ensaios de permeabilidade conforme a sua natureza	26

LISTA DE SÍMBOLOS

k : Coeficiente de permeabilidade.
 γ : Peso específico do fluido.
 e : Índice de vazios.
 C : Fator de forma.
 D : Diâmetro efetivo das partículas.
 μ : Viscosidade do fluido.
 k_o : Fator dependente da forma dos poros e da trajetória da linha de fluxo.
 S : Superfície específica.
 V : Velocidade de escoamento.
 i : Gradiente hidráulico.
 Q : Vazão.
 L : Altura inicial da amostra.
 A : Área inicial da amostra onde flui a água.
 h : Carga hidráulica.
 t : Tempo de ensaio.
 d : diâmetro do furo ensaiado.
 d_1 : diâmetro interno do tudo de ensaio.
 a : Área inicial transversal do piezômetro.
 c_v : Coeficiente de adensamento.
 m_v : Coeficiente de variação volumétrica.
 hf : Carga hidráulica final.
 hi : Carga hidráulica inicial.
 Δh_o : Variação de carga hidráulica.
 Δt : tempo de ensaio aplicado.
 hm : altura da coluna d'água inicialmente aplicada.
 x_1 : Variável de acordo com as curvas de rebaixamento do solo.
 x_2 : Variável de acordo com as curvas de rebaixamento do solo.
 y_1 : Variável de acordo com as curvas de rebaixamento do solo.
 y_2 : Variável de acordo com as curvas de rebaixamento do solo.
 Cu : Coeficiente de condutividade.
 r : Raio.
 π : Proporção numérica (3.14159).

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	11
1.1 INTRODUÇÃO	11
1.2 OBJETIVOS	12
1.2.1 Objetivo Geral.....	12
1.2.2 Objetivos Específicos	12
1.3 JUSTIFICATIVA	12
1.4 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	13
1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	13
CAPÍTULO 2	14
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1.1 Características gerais dos solos.....	14
2.1.1.1 Origem e formação	14
2.1.1.2 Classificação dos solos	15
2.1.1.3 Solo laterítico	17
2.1.1.4 Solo colapsível.....	17
2.1.1.5 Água no solo	18
2.1.2 Permeabilidade do solo	18
2.1.2.1 Fatores que influenciam na permeabilidade	19
2.1.2.2 Valores típicos de coeficiente de permeabilidade	21
2.1.2.3 Obtenção do coeficiente de permeabilidade	22
2.1.2.3.1 Métodos diretos	22
2.1.2.3.1.1 Permeabilidade de carga constante	22
2.1.2.3.1.2 Permeabilidade de carga variável	23
2.1.2.3.2 Métodos indiretos	24
2.1.2.3.3 Métodos de campo	25
2.1.2.3.3.1 Execução de furos de sondagem.....	26
2.1.2.3.3.1.1 Ensaio simples de reconhecimento do solo	27
2.1.2.3.3.2 Ensaio de infiltração.....	27
2.1.2.3.3.3 Ensaio de bombeamento	28
2.1.2.3.3.4 Ensaio de rebaixamento	29
2.1.2.3.3.5 Ensaio de recuperação	30
CAPÍTULO 3	32
3.1 METODOLOGIA	32

3.1.1 Caracterização da permeabilidade <i>in situ</i> por ensaios de infiltração	32
3.1.2 Localização da área de estudo	32
3.1.3 Caracterização do solo local	33
3.1.4 Furos de sondagem	34
3.1.5 Equipamentos necessários	35
3.1.6 Procedimentos dos ensaios	35
3.1.7 Cálculo do coeficiente de permeabilidade	37
CAPÍTULO 4	39
4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
4.1.1 Vazão média	39
4.1.2 Coeficiente de permeabilidade	41
CAPÍTULO 5	47
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
CAPÍTULO 6	48
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	48
REFERÊNCIAS.....	49
ANEXOS.....	53

CAPITULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

Com a diversidade atual de obras projetadas e executadas na construção civil, exige-se cada vez mais preparo e controle em relação a utilização e manuseio de solos. Para que estes solos sejam empregados corretamente nas obras de engenharia é necessário que se tenha o controle de algumas propriedades. A permeabilidade é uma delas, determinada através de um fator conhecido como coeficiente de permeabilidade.

De acordo com Dias (2012), a permeabilidade representa uma grandeza que expressa a dificuldade que o solo oferece a passagem de água através dos seus poros, sendo de grande importância para a quantificação do fluxo de água no meio poroso. Quanto maior o coeficiente de permeabilidade do solo, mais facilmente a água irá permear por ele.

A estrutura e a granulometria apresentam influência sobre o índice de vazios do solo, a distribuição dos poros e a sua porosidade, dificultando o movimento da água em menor ou em maior intensidade (MELLO; TEIXEIRA, 1962). Segundo Santos (2010), a determinação da permeabilidade dos solos fundamenta-se na aplicação da lei de Darcy, enunciada em 1850, onde este fator é apresentado como coeficiente de permeabilidade (k), preditivos por Caputo (1996) e obtidos através de ensaios de métodos diretos e de campo.

Os valores de permeabilidade variam em função da estrutura interna dos solos, sendo a estrutura, uma das suas características mais importantes, principalmente ao se tratar de solos finos. A movimentação de água será definida por uma relação entre a maneira de como as moléculas sólidas estão estruturadas e a carga hidráulica que está sendo aplicada (DIEMER, 2008).

Bueno e Vilar (1979) também destacaram que a estrutura é um dos fatores mais importantes do solo em relação à sua permeabilidade, especialmente para os solos argilosos. Os principais parâmetros do solo que afetam a permeabilidade são: o índice de vazios, o tamanho das partículas de solo, grau de saturação e a estrutura, sendo estes, em geral, dependentes entre si em relação ao efeito causado à permeabilidade.

Segundo Pinto (2006), o estudo da percolação da água nos solos é muito importante pois influi em três classes de problemas práticos da engenharia: cálculo das vazões, como por exemplo, na estimativa da quantidade de água que se infiltra numa escavação; análise de recalques, que ocorrem pela redução e expulsão de água dos vazios do solo; e estudos de estabilidade que determinam a resistência de um solo, sendo que a tensão efetiva, depende da

pressão neutra que, por sua vez, depende das tensões provocadas pela percolação da água no solo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar através de ensaios *in situ* a variação da permeabilidade ao longo da profundidade de solo residual e colapsível do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz em Cascavel-PR.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar ensaios de permeabilidade em campo;
- Determinar a variação de permeabilidade ao longo da profundidade;
- Comparar resultados com outros solos semelhantes de bibliografias relacionadas ao assunto.

1.3 JUSTIFICATIVA

A análise da permeabilidade está ligada a qualquer tipo de atividade que será realizada em função do deslocamento ou movimentação de solos, ela proporciona um controle de como as partículas de água estarão se movimentando através do solo, com o emprego de estruturas que irão gerar cargas superiores ao peso do solo no seu estado natural (SANTOS, 2010).

Este tipo de análise pode auxiliar na caracterização de um solo local, resultando em dados que podem ser utilizados na execução de projetos de engenharia, tais como escavações, sumidouros de água de chuva e drenagens. Existem várias pesquisas relacionadas a este mesmo conteúdo, como apresentadas por Dias (2012), Furtini (2009) e Diemer (2008), porém, os coeficientes de permeabilidade, que são os fatores resultantes dessas pesquisas, variam de acordo com a composição do solo local, limitando a aplicação dos dados apenas para a região onde foram obtidos, o que de fato, releva a importância desta pesquisa.

Relacionado com a execução de obras de engenharia, as práticas que serão apresentadas neste estudo são aplicadas no controle de cálculo de vazões, que são utilizados no manejo de infiltração de água em escavações, em obras de drenagem, nos cálculos da resistência de solos,

análises de recalques em maior ou em menor grau e em atividades de em manuseio do nível d'água (DIEMER, 2008).

O rebaixamento do nível d'água é uma prática preliminar que pode auxiliar na solução de problemas que possam ser encontrados na consolidação de uma obra de engenharia na cidade de Cascavel-PR, como afloramentos ou níveis d'água muito próximos à superfície do solo.

1.4 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A estrutura de um solo é um dos fatores mais significantes com relação à sua permeabilidade, especialmente quando se trata de um solo argiloso como o da região de Cascavel-PR.

Considerando que a permeabilidade é o principal fator para dimensionamento de sumidouros de água de chuva e de drenagem, qual é a variação deste coeficiente ao longo da profundidade do subsolo do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz em Cascavel-PR?

1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa se limita à análise da variação da permeabilidade do subsolo do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz, material de estudo localizado em Cascavel-PR, através de ensaios de permeabilidade realizados *in situ* especificamente em três furos de sondagem executados exclusivamente para os ensaios, onde foram realizados três ensaios em cada um desses furos.

CAPÍTULO 2

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 Características gerais dos solos

Os solos são compostos por aglomerados de partículas sólidas com água (ou outro líquido) e ar nos seus intermédios. Essas partículas, de maneira geral, apresentam-se livres para deslocar-se entre si. Em algumas situações, uma pequena cimentação pode ocorrer entre elas, mas em um grau mais baixo do que nos cristais de uma rocha, de um metal ou nos agregados de um concreto. A maneira de como os solos encontram-se na natureza, estruturalmente falando, depende de como ocorrem as movimentações das partículas sólidas entre si no seu período de formação (PINTO, 2006).

2.1.1.1 Origem e formação

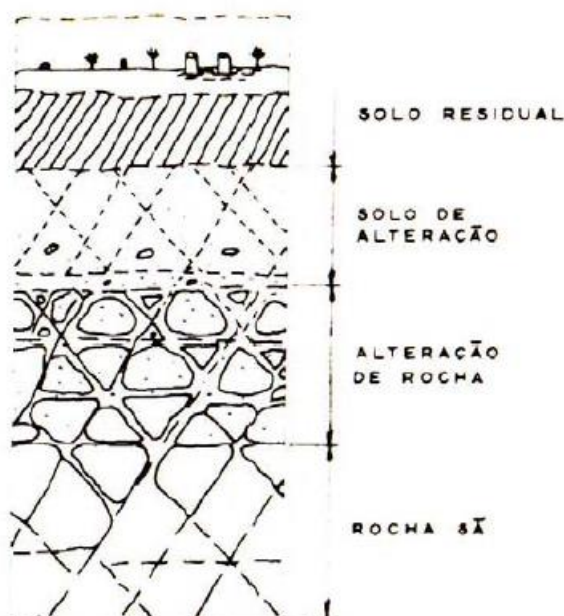
Os solos são materiais que resultam do processo de intemperismo das rochas, por desintegração mecânica ou decomposição química. Por desintegração mecânica, através de agentes como temperatura, vegetação, água e vento, formam-se os pedregulhos, areias, siltes e argilas. Por decomposição química, o principal agente é a água através de mecanismos de ataque como a oxidação, carbonatação, hidratação e efeitos químicos causados por vegetações. Esses processos atuam, simultaneamente, em determinados locais e condições climáticas, podendo haver predominância de um deles sobre o outro, na formação dos solos (CAPUTO, 1996).

As rochas expostas à atmosfera, sofrem ação direta do calor do sol, do crescimento de organismos e da umidade das chuvas, iniciando assim os processos que resultam em modificações no aspecto físico e na composição química dos seus minerais. Esses processos são denominados como intemperismo, fenômeno responsável pela formação de materiais semiconsolidados que dão início à formação do solo (LEPSCH, 2010).

Ao ocorrer à ação dos mecanismos de intemperização, o material resultante poderá permanecer ou não sobre sua rocha de origem. No primeiro caso, pode-se apontar os chamados solos residuais, comumente encontrados no Brasil, sobretudo no Centro-Sul. Como exemplo, tem-se as chamadas “terras roxas” originalizadas da decomposição dos basaltos. A separação entre a rocha matriz e o solo residual é gradual, além disso, pode-se distinguir pelo menos duas

faixas distintas entre o solo e a rocha. A primeira, sobre rocha, denominada rocha alterada ou rocha decomposta e a segunda, logo abaixo do solo, denominado como solo de alteração. A Figura 2.1 ilustra um perfil de intemperização de rochas ígneas (BUENO; VILAR, 1979).

Figura 2.1 – Perfil comum de intemperização de rochas ígneas.



Fonte: Bueno e Vilar, 1979.

Caso aconteça remoção do produto de alteração da rocha matriz por um agente qualquer, teremos os chamados solos transportados, que podem ser aluviais, eólicos, coluviais e glaciais, sendo a homogeneidade e o tamanho das partículas dos solos transportados, determinados pela capacidade de transporte dos agentes (BUENO; VILAR, 1979).

Os autores Bueno e Vilar (1979) ainda relatam sobre os chamados solos orgânicos, que são formados a partir de uma mistura entre restos de organismos animais ou vegetais, com sedimentos preexistentes. Geralmente, a formação desse tipo de solo dá-se em locais bem característicos, tais como as depressões continentais, as baixadas litorâneas e as áreas adjacentes aos rios.

2.1.1.2 Classificação dos solos

Uma das características que diferencia os solos é o tamanho das partículas que os compõem. Alguns solos possuem grãos perceptíveis a olho nu, como a areia do mar ou os grãos

de pedregulhos, outros solos possuem grãos tão finos que se transformam em barro quando são umedecidos, impedindo a visualização individual das partículas (PINTO, 2006).

Segundo Costa (2014), a classificação dos solos dá-se a partir das características e propriedades que este possui, sendo divididos em solos argilosos, solos siltosos, solos arenosos e rochas. Entretanto essa classificação pode ter algumas variações, devido a alguns solos possuírem partículas de diversos tamanhos, como os siltes argilosos e as areias siltosas, por exemplo.

Definições específicas são empregadas para as várias faixas de tamanho dos grãos. Os limites de tamanho dos grãos variam conforme os sistemas de classificação, enquadrando-se em denominações específicas. Os valores adotados pela ABNT, especificados pela NBR 6502/1995, são indicados na Tabela (2.1).

Diferentemente dos termos adotados pela ABNT, o limite entre as frações silte e areia também é frequentemente tomado como 0,075mm, correspondentes à abertura da peneira nº 200, que é a peneira mais fina utilizada em ensaios laboratoriais. O conjunto de silte e argila é denominado como a fração de finos do solo, enquanto o conjunto areia e pedregulho emprega-se a fração grossa do solo. Para a fração argila, considera-se com frequência, como a fração de diâmetros abaixo de 0,002 mm, correspondente ao tamanho mais aproximado das partículas de constituição mineralógica dos minerais-argila (PINTO, 2006).

Tabela 2.1 – Limites das frações de solo pelo tamanho dos grãos.

Fração	Limites definidos pela ABNT
Matacão	de 20 cm a 1 m
Pedra	de 6,0 cm a 20 cm
Pedregulho	de 2,0 mm a 6,0 cm
Areia grossa	de 0,6 mm a 2,0 mm
Areia média	de 0,2 mm a 0,6 mm
Areia fina	de 0,06 mm a 0,2 mm
Silte	de 0,002 mm a 0,06 mm
Argila	inferior a 0,002 mm

Fonte: NBR 6502/1995.

No Brasil, alguns tipos de solos são classificados pela população a partir da região onde se encontram. No Estado de São Paulo, a terra-roxa é predominante, um solo laterítico de coloração marrom-avermelhada, de grande importância para a cultura do café. No Recôncavo

Baiano temos o massapê, um solo residual, de cor escura, não laterítico, muito fértil, apresentando comportamento peculiar do ponto de vista geotécnico (CAPUTO, 1996).

2.1.1.3 Solo laterítico

Os solos lateríticos, comumente encontrados em regiões tropicais, possuem uma coloração avermelhada por conterem grandes partes de argila, constituída por uma alta concentração ferro e alumínio em forma de hidróxidos, óxidos e também minerais caulíníticos. No Brasil, há uma predominância do solo tropical com formação laterítica, sendo a região sul originalizada de rochas vulcânicas, composta por uma grande fração de hematita (CORRÊA, 2015).

Conforme apresentado por Nogami e Villibor (1995), a mineralogia que compõe os solos superficiais lateríticos é relativamente simples, com alta predominância de quartzo (mineral encontrado com frequência nas frações de areia desses solos). Além disso, o quartzo também atribui ao solo características decorrentes de suas peculiaridades como depressões que indicam efeitos de dissolução lenta e a presença de película de óxidos, que dá uma tonalidade rósea, amarela, arroxeadas ou avermelhadas ao conjunto.

Os solos lateríticos se apresentam na natureza com índice de vazios elevado, não saturados e conseqüentemente baixa resistência, podendo ser reestruturados a partir de compactação, com capacidade de se auto contrair com a redução do teor de umidade (ZORZI, 2008).

2.1.1.4 Solo colapsível

Segundo Gonçalves (2006), quando certos tipos de solos são umedecidos, eles sofrem um colapso na sua estrutura, originando recalques imediatos e de grandes proporções. Esses solos são denominados como solos colapsíveis, que diminuem bruscamente o seu volume quando são umedecidos, sem ao menos ocorrer variação da carga aplicada. Esse fenômeno de colapsibilidade dá-se na combinação de dois fatores, a carga limite crítica de colapso e do umedecimento do solo, que atuam na estrutura das partículas ligadas por vínculos de sucção e elementos cimentantes, originando uma estrutura porosa e instável.

Ao ocorrer a destruição dos meniscos capilares, a inundação do solo irá diminuir a pressão de sucção, amolecendo o cimento natural e levando as partículas a ruptura. A redução

da pressão de sucção em determinados carregamentos provoca microrrupturas, que se manifestam através de recalques (PINTO, 2006).

2.1.1.5 Água no solo

No interior da estrutura dos solos, o tamanho variado dos tubos capilares pode oferecer resistência à percolação de água pelos seus vazios. Se o volume de água lançado na superfície for maior que a quantidade que pode percolar momentaneamente para o interior do solo, água tende a se concentrar na superfície ou escorrer superficialmente, caso o terreno apresente inclinação (OLIVEIRA, 1990 *apud* SAMPAIO, 2004).

Quando a água entra em contato com as partículas argilosas, componentes de um solo, as moléculas de água se orientam em relação aos íons que circulam essas partículas. Dessa maneira, os íons se afastam das partículas argilosas e ficam envolvidos por moléculas de água. Com a elevação do teor de umidade do meio, forma-se no entorno das partículas argilosas a camada dupla, fazendo com que as moléculas de água sejam atraídas pelos íons do solo (PINTO, 2006).

Segundo Diemer (2008), frequentemente a água é encontrada, na composição dos solos, preenchendo os vazios em partes ou em totalidade. Quando submetida a energias potenciais diferentes, a água desloca-se no interior do solo, dando origem a tensões internas desiguais.

2.1.2 Permeabilidade do solo

De acordo com Bueno e Vilar (1979), o solo é constituído por uma parte sólida, que forma o seu esqueleto, e uma parte fluída que ocupa os seus vazios. Nos solos grossos, as forças que atuam na superfície são inexpressivas, com a água livre entre as partículas sólidas. De acordo com a carga hidráulica aplicada neste meio, a água poderá manter-se em equilíbrio hidrostático ou fluir, sob a ação de força gravitacional.

Com relação aos solos finos, no caso de haver pressões elevadas sendo exercidas na superfície, um efeito chamado de coesão verdadeira pode ocorrer na estrutura do solo. Cujas atuação ocorre devido à alteração da viscosidade das camadas de água presente entre as partículas de solo. Como resultante desse efeito, havendo um potencial hidráulico considerável, o restante da água que compõe esses solos finos fica livre para fluir entre as partículas (BUENO; VILAR, 1979).

Há vários métodos para determinação do coeficiente de permeabilidade (k) desenvolvidos através de dados empíricos, que podem ser divididos em modelos preditivos e experimentais. Os modelos preditivos baseiam-se em relações empíricas entre a curva de retenção hidráulica do solo e a sua condutividade. Os experimentais envolvem a utilização de parâmetros laboratoriais ou de campo (FREDLUND e RAHARDJO, 1993 *apud* DIAS, 2012).

De acordo com Hillel (1982), a melhor maneira de se obter o coeficiente de permeabilidade é através de medidas experimentais diretas, já que não há previsões teóricas comprovadas que o caracterizem. A utilização de modelos preditivos para a determinação desse fator pode levar a erros que variam de uma a quatro ordens de magnitude, podendo ser maiores ao se tratar de solos com baixo índice de saturação.

McCartney e Zornberg (2010) apresentaram valores resultantes encontrados, para um solo composto por uma argila compactada e de baixa plasticidade por ensaios de laboratório, semelhantes a valores obtidos por relação preditiva, apesar do coeficiente de permeabilidade previsto por bibliografia ser duas vezes menor para o solo em estudo.

Segundo Dias (2012), as variações nos valores resultantes enfatizam a importância da determinação da permeabilidade de um solo, por meio de métodos experimentais, ao invés de basear-se apenas em relações preditivas de bibliografias.

2.1.2.1 Fatores que influenciam na permeabilidade

Alguns fatores que fazem parte das características dos grãos, de cada tipo de solo, têm influência direta no seu coeficiente de permeabilidade. Siltes, por exemplo, apresentam valores de coeficiente menor que os de solos compostos por areias e pedregulhos, o que se define devido a variação do tamanho das partículas sólidas (SANTOS, 2010).

De acordo com Bueno e Vilar (1979), as principais características do solo, que interferem nos valores de permeabilidade, são o índice de vazios do solo, sua estrutura, grau de saturação e o tamanho das partículas. Estas são características independentes, mas, com efeitos difíceis de se avaliar separadamente. Pode-se relacionar esses fatores a partir dos aspectos qualitativos seguintes:

a. Tamanho das partículas: a partir do diâmetro efetivo das areias, o coeficiente de permeabilidade desses solos pode variar, a grosso modo, de acordo com o quadrado do tamanho das partículas sólidas.

b. Índice de vazios: expresso por uma grandeza adimensional, onde são relacionados os valores de volume dos vazios com o dos sólidos, resultante a qual o coeficiente de permeabilidade tem seus valores proporcionais.

c. Grau de saturação: quanto maior o grau de saturação, maior será a permeabilidade, devido a presença de ar nos vazios impedir a passagem de água.

d. Estrutura: amostras do mesmo solo, com índice de vazios diferentes apresentarão variação nos valores de permeabilidade, em função da estrutura. A amostra no estado floculada terá uma permeabilidade maior do que a amostra no estado disperso.

Bueno e Vilar (1979), ainda apresentam a Equação (2.1) de Poiseuille e a Equação (2.2) de Kozeny-Carman, que auxiliam na compreensão da influência destes fatores citados acima.

A Equação de Poiseuille aplica-se à escoamentos capilares, com os seguintes padrões:

$$k = C \cdot D^2 \cdot \frac{\gamma \cdot e^3}{(\mu(1+e))} \quad (2.1)$$

Onde: k = coeficiente de permeabilidade;

C = fator de forma;

D = diâmetro efetivo das partículas;

γ = peso específico do fluido;

μ = viscosidade do fluido;

e = índice de vazios do solo.

A Equação de Kozeny-Carman aplica-se à caracterização da permeabilidade em meios porosos, formulada como:

$$k = \frac{1}{k_o \cdot S^2} \cdot \frac{\gamma \cdot e^3}{(\mu(1+e))} \quad (2.2)$$

Onde: k = coeficiente de permeabilidade;

k_o = fator dependente da forma dos poros e da trajetória da linha de fluxo;

S = superfície específica;

γ = peso específico do fluido;

μ = viscosidade do fluido;

e = índice de vazios do solo.

2.1.2.2 Valores típicos de coeficiente de permeabilidade

Algumas literaturas, como as apresentadas por Pinto (2006) e Neto (2007), relacionam valores típicos de coeficiente de permeabilidade e também a classificação do grau de permeabilidade dos solos para a execução de sumidouros de água de chuva e de drenagem, segundo seu coeficiente de permeabilidade, conforme a Tabela (2.2) e a Tabela (2.3).

Tabela 2.2 – Valores típicos como ordem de grandeza para o coeficiente de permeabilidade.

Solo	Valor de k
Argilas	$<10^{-7}$ cm/s
Siltes	10^{-5} a 10^{-7} cm/s
Areias argilosas	10^{-3} a 10^{-5} cm/s
Areias finas	10^{-2} a 10^{-3} m/s
Areias médias	10^{-2} a 0,1 cm/s
Areias grossas	$>0,1$ cm/s

Fonte: Pinto, 2006.

De fato, os valores da Tabela (4.1) representam apenas uma ordem de grandeza, haja visto que um dos principais fatores que influenciam na determinação do coeficiente de permeabilidade são os finos do solo e não a predominância de um tamanho específico de grãos. Dessa maneira, uma areia grossa com porções finas de solo na sua composição pode ser menos permeável que uma areia fina com grãos uniformes. Em contrapartida, o coeficiente de permeabilidade não apenas do tipo de solo, como também de sua estrutura e da compactidade ou consistência (PINTO, 2006).

Tabela 2.3 – Caracterização do grau de permeabilidade dos solos segundo seus coeficientes de permeabilidade, considerando o funcionamento de sumidouros de água pluvial e drenagem.

Grau de permeabilidade	Valor de k
Praticamente impermeável	$<10^{-7}$ cm/s
Muito baixa	10^{-5} a 10^{-7} cm/s
Baixa	10^{-3} a 10^{-5} cm/s
Média	0,1 a 10^{-3} cm/s
Elevada	$>0,1$ cm/s

Fonte: Lambe e Whitman, 1976 *apud* Neto, 2007.

2.1.2.3 Obtenção do coeficiente de permeabilidade

De acordo com Diemer (2008), o coeficiente de permeabilidade pode ser determinado a partir de diversas maneiras, podendo estas serem divididas em três categorias, como os métodos diretos, métodos indiretos e métodos de campo.

Segundo Caputo (1996), a determinação do coeficiente de permeabilidade (k) é predita na lei experimental de Darcy do regime de escoamento, representada na Equação (2.3). Onde afirma-se que a velocidade com que um fluido escoar através de um material granular é inversamente proporcional à viscosidade desse fluido, isto é, quanto menor a viscosidade, maior a velocidade. Também é apresentado que os níveis de pressão hidrostática são proporcionais à velocidade de descarga.

$$V = k \cdot i \quad (2.3)$$

Onde: V = velocidade de escoamento;
 k = coeficiente de permeabilidade;
 i = gradiente hidráulico.

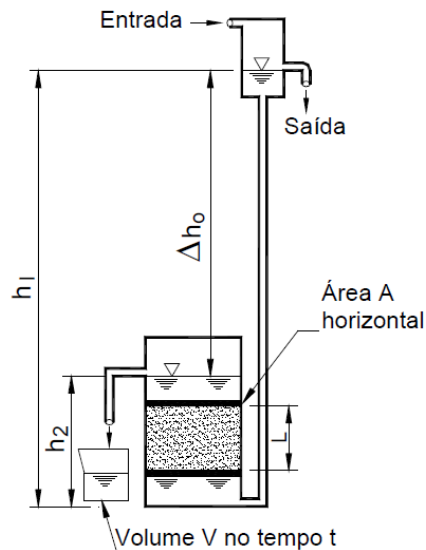
2.1.2.3.1 Métodos diretos

Estes métodos são baseados em técnicas de ensaio de laboratório, que resultam na leitura direta da permeabilidade do solo, bastante utilizados por permitirem uma determinação precisa para a amostra ensaiada. Esses parâmetros caracterizam dois tipos de ensaios, o permeâmetro de carga constante e o de carga variável (SANTOS, 2010).

2.1.2.3.1.1 Permeabilidade de carga constante

Frequentemente empregada para solos granulares como areias, pedregulhos e solos com textura mais grosseiras, esta técnica de ensaio consiste na medida do volume de água, que permeia por um corpo de prova devidamente preparado, com altura e seção conhecidas, como mostra o esquema da Figura (2.2). Devido à velocidade de circulação da água, a evaporação desta coletada através de um recipiente na saída do corpo de prova, pode ser desprezada. O coeficiente de permeabilidade será calculado pela lei de Darcy, relacionando-a com a vazão atuante e a área da amostra na Equação (2.4) (RIBEIRO, 2002).

Figura 2.2 – Ensaio de permeabilidade com carga constante.



Fonte: Ribeiro, 2002.

$$k = \frac{V \cdot L}{A \cdot t \cdot \Delta h} \quad (2.4)$$

Onde: k = coeficiente de permeabilidade da amostra;

L = altura inicial da amostra;

A = área da amostra onde flui a água;

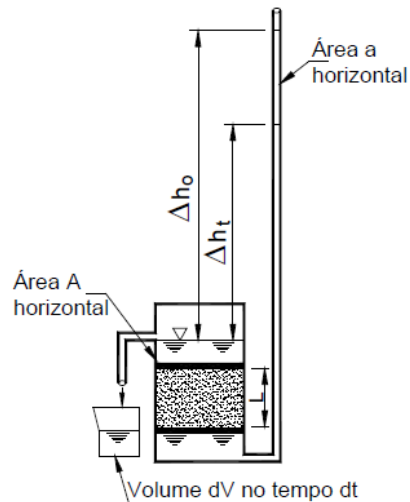
Δh = variação da carga hidráulica;

t = tempo de escoamento da água.

2.1.2.3.1.2 Permeabilidade de carga variável

Segundo Santos (2010), o ensaio de permeabilidade por carga variável aplica-se em solos com baixa permeabilidade, com valores inferiores a ordem de 0,01 cm/min. O ensaio é executado conforme a disposição da Figura (2.3), analisando a variação da carga hidráulica em função do tempo de ensaio aplicado. Após a coleta de dados, os valores caracterizados nos ensaios são aplicados na Equação (2.5) para obter-se o coeficiente de permeabilidade. Este ensaio pode ser aplicado tanto em uma amostra indeformada, com teor de umidade natural, quanto em amostras recompostas com teor de umidade determinado em laboratório.

Figura 2.3 – Ensaio de permeabilidade com carga variável.



Fonte: Ribeiro, 2002.

$$k = \frac{(a \cdot L)}{(A \cdot \Delta t)} \cdot \log\left(\frac{\Delta h_0}{\Delta h_t}\right) \quad (2.5)$$

Onde: k = coeficiente de permeabilidade da amostra;

a = área inicial transversal do piezômetro;

L = altura inicial da amostra;

A = área inicial da amostra onde flui a água;

Δh_0 = carga hidráulica no instante inicial;

Δh_t = carga hidráulica no instante final;

Δt = variação de tempo entre os instantes iniciais e finais.

Para obtenção do coeficiente de permeabilidade através desse método de ensaio, de acordo com a NBR 14545/2000, deixa-se a água atravessar a amostra de solo posicionada no permeâmetro e com o auxílio de um piezômetro instalado, mede-se a diferença apresentada entre a carga inicial e a carga final, em um determinado período de tempo. Na medição do fluxo de água ativo no corpo de prova, o volume circulado é medido de maneira que não haja a possibilidade de evaporação, o cuidado é fundamental devido a característica de baixa permeabilidade do material que pode ocasionar ensaios relativamente longos.

2.1.2.3.2 Métodos indiretos

Os métodos indiretos de determinação do coeficiente de permeabilidade podem ser obtidos a partir da utilização de fórmulas de correlação com ensaios de campo ou variáveis, que

descrevem a estrutura e a textura do solo, relacionando essas propriedades com a circulação de água. De fato, essas técnicas podem apresentar grandes imprecisões, mas a vantagem é que podem proporcionar resultados de maneira rápida (RIBEIRO, 2002).

Dentre as correlações indiretas utilizadas, a Equação (2.6) proposta por Hazen, é aplicada para estabelecer estimativas grosseiras da permeabilidade (k) de solos arenosos, com o valor do diâmetro efetivo entre 0,1 e 3 mm e coeficiente de uniformidade inferior a 5. (MELLO e TEIXEIRA, 1967).

$$k = 100 . D^2 \quad (2.6)$$

Onde: k = coeficiente de permeabilidade;

D = diâmetro efetivo das partículas.

De acordo com Pinto (2006), quando um solo é submetido à compressão, sua velocidade de recalque depende da velocidade com que a água sai dos seus vazios especificamente do coeficiente de permeabilidade. No estudo desses recalques e do seu desenvolvimento ao longo do tempo, são realizados ensaios de adensamento. A partir da análise dos dados baseados nas teorias correspondentes a estes ensaios, pode-se obter o coeficiente de permeabilidade do solo pela Equação (2.7).

$$k = c_v . m_v . \gamma_o \quad (2.7)$$

Onde: k = coeficiente de permeabilidade;

c_v = coeficiente de adensamento;

m_v = coeficiente de variação volumétrica;

γ_o = peso específico da água.

2.1.2.3.3 Métodos de campo

Os ensaios que tem por finalidade a determinação do coeficiente de permeabilidade de um solo são realizados em locais objetos de estudo, para consolidação ou implantação de obras de engenharia como barragens, canais e estradas. Mesmo estando associados ao método de prospecção empregado, os ensaios de permeabilidade podem ser classificados conforme a

maneira de realização e o diferencial de pressão positivo ou negativo aplicado, de acordo com a Tabela (2.2) (ABGE, 1996).

Tabela 2.2 – Tipos de ensaios de permeabilidade conforme a sua natureza.

Maneira de realização	Pressão aplicada	Denominação dos ensaios	Métodos de prospecção
Nível constante	Carga	Infiltração	Sondagens, poços e cava
	Descarga	Bombeamento	Poços e sondagens
Nível variável	Carga	Rebaixamento	Poços e sondagens
	Descarga	Recuperação	Poços e sondagens

Fonte: ABGE, 1996.

O coeficiente de permeabilidade é um índice que quantifica a maior ou a menor resistência que o solo apresenta perante o fluxo de água através de seus vazios. A realização de um furo de sondagem na determinação da capacidade de absorção, apresentada pelo solo, elimina a necessidade da escavação de valas, principalmente quando os ensaios terem de ser realizados em níveis mais profundos (GIACHET *et al*, 2000).

2.1.2.3.3.1 Execução de furos de sondagem

Por definição, sondagem a trado é um processo de investigação geológico-geotécnico de solos através da utilização de trado, um tipo de amostrador de solo composto por lâminas de corte que podem ser espiraladas ou convexas. A utilização desse instrumento tem por finalidade a coleta de amostras deformadas, identificação dos horizontes que compõem o terreno analisado e determinação de profundidade no nível d'água (DEINFRA, 1994).

Segundo a IN-04/1994 – Instrução normativa para execução de sondagens a trado, os equipamentos padrões para a execução de furos de sondagem são os seguintes:

- Trado concha com diâmetro mínimo de 63,5 mm;
- Trado espiral com diâmetro mínimo de 63,5 mm;
- Cruzetas;
- Hastes e luvas de ferro galvanizado com diâmetro mínimo de 25 mm;
- Ponteira terminada em bisel com 63 mm de largura e 200 mm de comprimento mínimo.

Os furos de sondagem deverão ser iniciados após a realização de uma limpeza da área, permitindo a execução de todas as operações sem obstáculos. A sondagem deverá ser iniciada a partir da utilização do trado concha, e seu avanço será realizado até quando ocorrer

desmoronamentos sucessivos da parede do furo ou quando o avanço do trado for inferior a 5 centímetros em 10 minutos de operação. Quando o avanço do trado concha for limitado, a operação do furo deverá ser continuada com a utilização do trado espiral. Se a sondagem atingir o nível freático, a sua profundidade deverá ser anotada e conferida pelo menos 3 vezes. A execução de furos subsequentes deve ser deslocada a uma distância mínima de 3 metros para qualquer direção (DEINFRA, 1994).

2.1.2.3.3.1.1 Ensaio simples de reconhecimento do solo

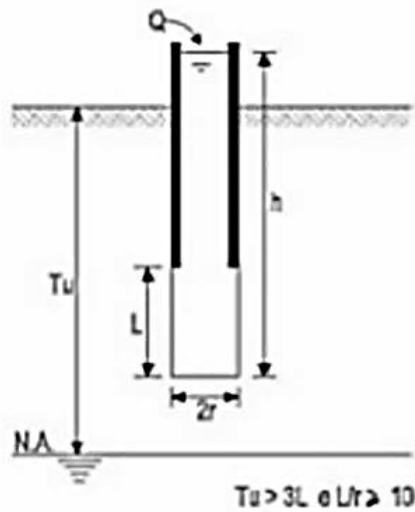
O ensaio de simples reconhecimento do solo (SPT) é um método de investigação que tem por objetivo a exploração e reconhecimento do subsolo. A NBR 6484/2001 – Sondagens de simples reconhecimento com SPT, apresenta os padrões normativos dos procedimentos e equipamentos necessários para realização deste ensaio.

De acordo com Costa (2014), a partir da execução do ensaio de sondagem SPT pode ser feita a coleta de amostras permitindo que se faça uma apuração tátil visual em campo e posteriormente, análises laboratoriais de caráter específico. Através dessas amostras pode ser determinada a espessura dos horizontes e a constituição do solo, analisando características como origem, cor, plasticidade e granulometria dispostas ao longo do perfil do terreno ensaiado.

2.1.2.3.3.2 Ensaios de infiltração

De acordo com ABGE (1996), a prática dos ensaios por infiltração consiste em realizar o controle do nível d'água em um furo de sondagem, numa posição constante ao longo dos tempos de ensaio medindo-se a vazão injetada necessária para manter o nível constante, conforme a disposição da Figura (2.4). Essa vazão é aplicada com valores relativos a coluna d'água e às dimensões do furo para obtenção do coeficiente de permeabilidade, conforme a Equação (2.8).

Figura 2.4 – Ensaio de rebaixamento em sondagens abaixo do nível d'água.



Fonte: ABGE, 1996.

$$k = \frac{Q}{h} \frac{1}{Cu.r} \quad (2.8)$$

Onde: k = coeficiente de permeabilidade;

Q = vazão de água injetada;

h = profundidade da coluna d'água;

r = raio do furo;

Cu = coeficiente de condutividade;

Tu = profundidade do nível d'água;

L = profundidade do furo.

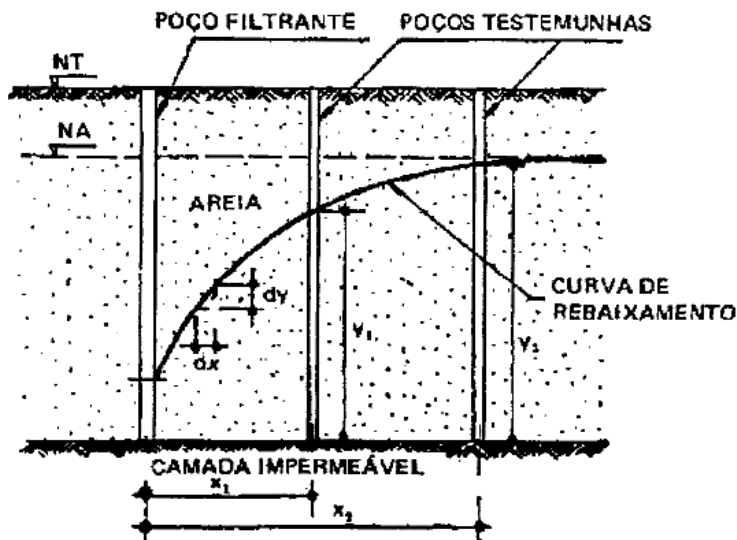
O coeficiente de condutividade (Cu) é configurado mediante aplicação dos valores de área de percolação lateral e de fundo de cada furo. Haja visto que para determinação do valor da profundidade do furo (L), deve ser desconsiderado a altura do tubo de acoplamento utilizado com o intuito de facilitar o controle do nível d'água (ABGE, 1996).

2.1.2.3.3.3 Ensaios de bombeamento

De acordo com Santos (2010), o ensaio de bombeamento é indicado para realização em maciços com descontinuidade como camadas de areia ou pedregulho localizadas abaixo do nível d'água. De acordo com a disposição da Figura (2.5), deve-se instalar piezômetros próximos um dos outros ou executar no mínimo dois testemunhos de observação (poços ou

sondagens) à uma profundidade inferior ao menor nível d'água obtido a cada ensaio, sendo a permeabilidade definida pela aplicação da Equação (2.9).

Figura 2.5 – Ensaio de permeabilidade por bombeamento.



Fonte: Santos, 2010.

$$k = Q \frac{\ln \frac{x_2}{x_1}}{\pi (y_2^2 - y_1^2)} \quad (2.9)$$

Onde: k = coeficiente de permeabilidade da amostra (cm/s);

Q = vazão (cm³/s)

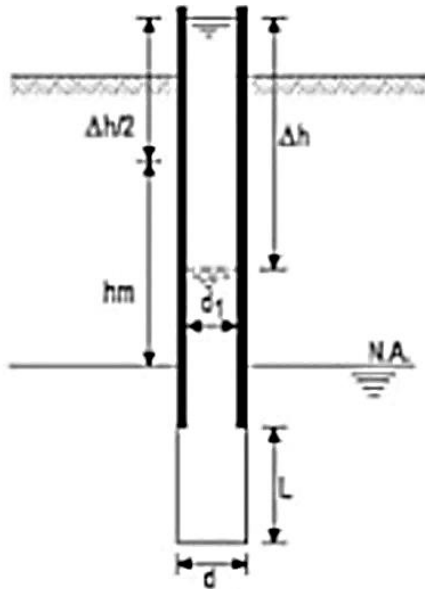
x_1 , x_2 , y_1 e y_2 serão variáveis de acordo com as curvas de rebaixamento apresentadas na Figura (2.5).

2.1.2.3.3.4 Ensaios de rebaixamento

Trata-se de um ensaio realizado a partir de cargas variáveis aplicadas em furos de sondagem ou poços, onde o nível d'água natural é alterado para que se possa ter controle da posição do mesmo, conforme a Figura (2.6). No decorrer do ensaio, este nível d'água tenderá a voltar para sua posição natural, dessa maneira, pode-se realizar a medição do devido rebaixamento do nível d'água ao longo do tempo. Recomenda-se que o ensaio seja dado por concluído ao atingir-se rebaixamento equivalente a 20% da carga inicial aplicada ou 30 minutos de ensaio (ABGE, 1996).

Com a realização dos ensaios, as dimensões do furo são relacionadas com as variações do nível d'água e de tempo na Equação (2.10) para obtenção do coeficiente de permeabilidade.

Figura 2.6 – Ensaio de rebaixamento em sondagens abaixo do nível d'água.



Fonte: ABGE, 1996.

$$k = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{d_1^2}{4hm \cdot \left(\frac{2L}{6,2} + d\right)} \quad (2.10)$$

Onde: k = coeficiente de permeabilidade;

Δh = variação do nível d'água no tempo ensaiado;

Δt = tempo de ensaio aplicado;

d_1 = diâmetro interno do tubo de ensaio;

hm = altura da coluna d'água inicialmente aplicada;

L = profundidade do furo desconsiderando o tubo de acoplamento;

d = diâmetro do furo ensaiado.

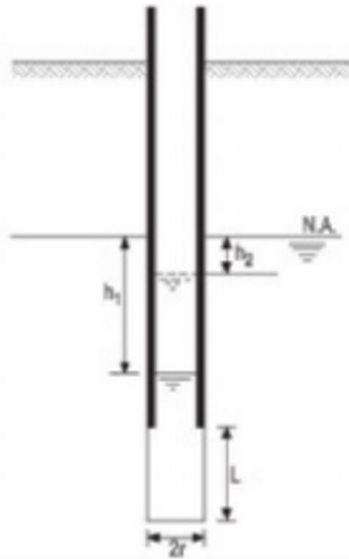
2.1.2.3.3.5 Ensaios de recuperação

Conforme ABGE (1996), os ensaios de recuperação consistem no bombeamento da água natural do furo de sondagem até obter-se um rebaixamento de 1 metro a partir do nível d'água inicial do meio ensaiado, mantendo-se dessa maneira até que se obtenha condições de fluxo permanente, de acordo com a Figura (2.7). A partir disso tem-se o instante inicial de

ensaio, podendo ser realizado o controle da recuperação do nível d'água ao longo do tempo de ensaio aplicado.

Com a obtenção dos valores relativo a altura inicial do nível d'água, altura de recuperação, dimensão e profundidade do furo, pode-se caracterizar um valor para o coeficiente de permeabilidade com o auxílio da Equação (2.11).

Figura 2.6 – Ensaio de rebaixamento em sondagens abaixo do nível d'água.



Fonte: ABGE, 1996.

$$k = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right)}{S \cdot \Delta t} \quad (2.10)$$

Onde: k = coeficiente de permeabilidade;

π = proporção numérica (3.14159);

r = raio do furo de sondagem;

h_1 = altura de coluna d'água inicialmente bombeada;

h_2 = diferença entre a altura de coluna d'água inicialmente bombeada e o nível d'água inicial;

S = coeficiente de rebaixamento determinado em função de L ;

L = profundidade do furo desconsiderando o tubo de acoplamento;

Δt = tempo de ensaio aplicado.

CAPÍTULO 3

3.1 METODOLOGIA

3.1.1 Caracterização da permeabilidade *in situ* por ensaios de infiltração

Os ensaios de permeabilidade por infiltração realizados em furos de sondagens são comumente utilizados em campo para caracterização hidrogeotécnica dos solos. Por meio destes ensaios é possível determinar os coeficientes de permeabilidade (k) do terreno objeto de estudo (DIEMER, 2008).

A metodologia apresentada nesta pesquisa foi embasada em Instruções Normativas publicadas pelo DEINFRA do Estado de Santa Catarina no ano de 1994 e na 4ª edição do Boletim de Orientações para Ensaios de Permeabilidade em Solos, publicado em 1996 pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia.

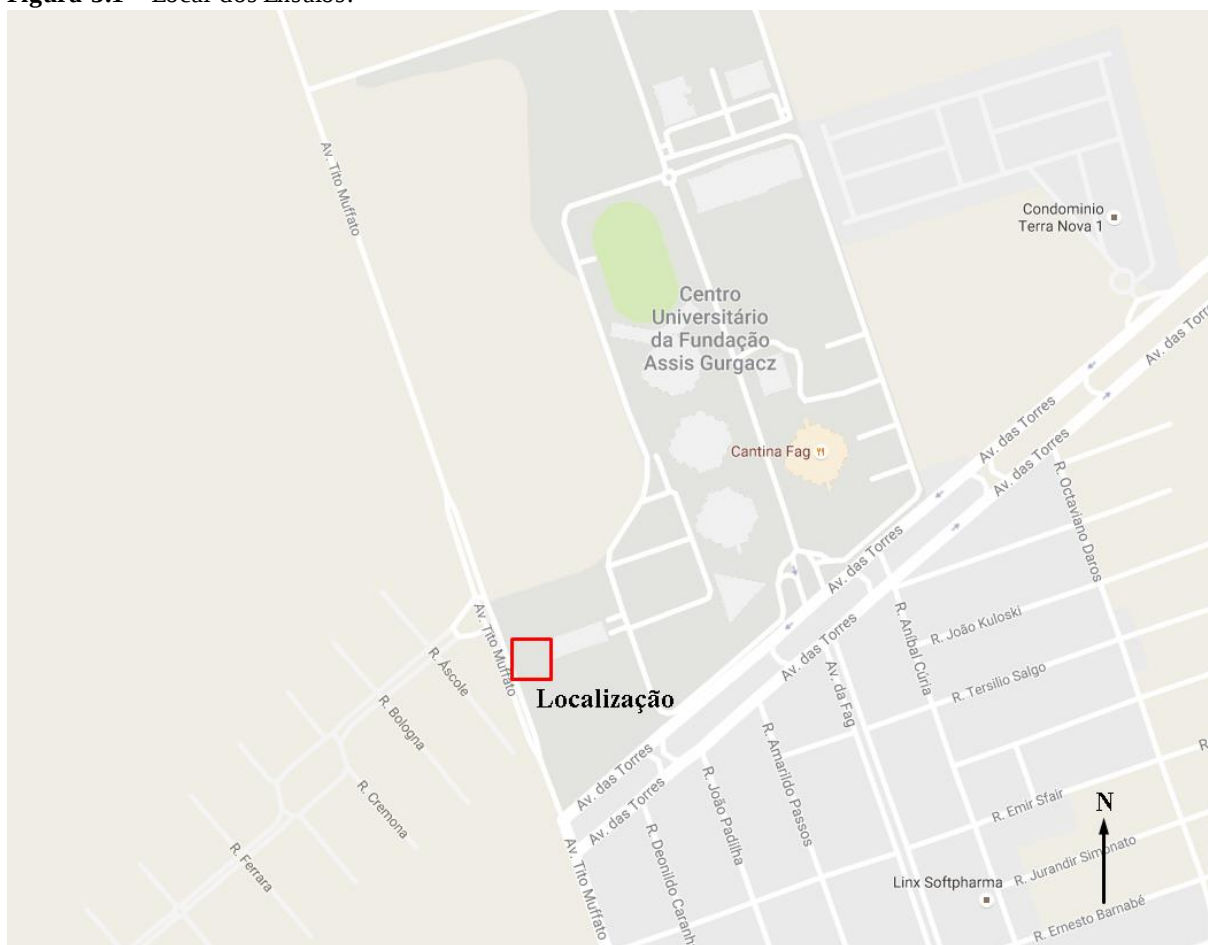
Segundo a IN-09/1994 – Execução de Sondagens, os ensaios de permeabilidade do tipo infiltração a nível de carga constante, são fundamentados na medida da vazão obtida pelo volume d'água absorvido durante um intervalo de tempo, em função da aplicação de cargas provocadas pela injeção de água nos furos de sondagem.

3.1.2 Localização da área de estudo

A cidade de Cascavel situa-se no terceiro planalto do Paraná, na região oeste do estado com altitude média de 785m e uma área de 2.091km², com clima subtropical úmido e temperatura anual média de 19 °C (DAMIN, 2012).

Os estudos de campo foram realizados em uma área localizada no Campo Experimental do Centro Universitário Assis Gurgacz conforme a Figura (3.1).

Os ensaios de campos foram realizados sem intervenção de obstáculos físicos. O local de estudo é livre de edificações ou outros empecilhos naturais, sendo esta uma área destinada especificamente para realização de ensaios de trabalhos que abordam temas discutidos nas disciplinas de Mecânica dos Solos e Fundações, como: caracterização do solo, compactação, colapsibilidade do solo e provas de carga.

Figura 3.1 – Local dos Ensaios.

Fonte: Google Maps, 2016.

3.1.3 Caracterização do solo local

O solo local é de origem laterítica e possui características colapsíveis com alto índice de porosidade, típicas de solos de regiões tropicais. A grande concentração de óxido de alumínio e de ferro atribuem ao solo uma tonalidade avermelhada com predominância de argila (DAMIN, 2012).

O processo de laterização do solo é característico de regiões tropicais com clima úmido e secas alternadas entre estações chuvosas, meio onde ocorre a remoção da sílica coloidal e o enriquecimento dos solos em ferro e alumina (CAPUTO, 1996).

De acordo com Pinto (2006), colapsíveis são solos não saturados que apresentam uma considerável e rápida compressão quando submetidos a um aumento de seu grau de saturação. Os solos lateríticos são compostos por uma fração de argila constituída por minerais cauliniticos em alta predominância. Geralmente, esses minerais agem como um tipo de cobrimento para partículas argilosas agregadas, estruturalmente falando.

3.1.4 Furos de sondagem

Tendo em vista a determinação das cotas dos furos de onde foram realizados os ensaios, realizou-se a análise de três laudos de sondagem SPT, realizados no mesmo local anteriormente a este trabalho. Em vista dos resultados analisados, optou-se por executar os ensaios de permeabilidade em furos de sondagem com 2 metros, 8 metros e 15 metros de profundidade, considerando-se que estes são pontos de alteração de camada e/ou resistência característica do solo. Os laudos analisados estão dispostos nos Anexos desta pesquisa.

Seguindo a IN-04/1994, os furos foram executados utilizando trado do tipo espiral com diâmetro de 6,35 centímetros ($2\frac{1}{2}$ polegadas).

A sondagem foi iniciada após a realização de uma limpeza no local dos furos, de maneira que as operações possam ser realizadas sem obstáculos. Os furos foram dispostos à uma distância maior do que 3,0 metros um do outro, conforme a Figura (3.2).

Figura 3.2 – Disposição dos furos no local dos ensaios.



Fonte: Autor, 2016.

3.1.5 Equipamentos necessários

Nos ensaios de permeabilidade que se realizaram, os seguintes equipamentos foram necessários:

- a) Tubo de acoplamento, composto por uma peça metálica com diâmetro 63,5 milímetros e 100 centímetros de altura;
- b) Cronômetro;
- c) Provetas graduadas;
- d) Mangueiras de poliéster e PVC com ½ polegada, para saturação dos furos;
- e) Material para anotações.

3.1.6 Procedimentos dos ensaios

Devido à localização do campo experimental, sendo este um tanto quanto retirado das instalações da Campo Experimental onde se aplicou esta pesquisa, verificou-se a necessidade da execução individualizada dos ensaios de cada cota, haja visto que para realização da saturação conjunta dos três furos de sondagem seria necessário um sistema hidráulico com várias ligações e controladores de vazão. Diante da limitação de alguns equipamentos, foi decidido iniciar os ensaios pelo furo de sondagem com 15 metros de profundidade.

Com os furos de sondagem executados de acordo com o item 3.1.4, os ensaios de infiltração foram iniciados a partir da saturação do furo, injetando água em baixa vazão constante com o auxílio de uma mangueira, durante 24 horas.

Após o período de saturação, feito o acoplamento do tubo metálico no furo, conforme a esquematização da Figura (3.3).

Figura 3.3 – Detalhe do tubo acoplado no furo.



Fonte: ABGE (1996).

Posicionando o tubo com a sua borda superior disposta no nível do terreno, novamente fez-se injeção de água no furo, controlando a vazão (Q) de água que era injetada com o auxílio de três mangueiras, até que o nível d'água fosse ajustado no mesmo nível da borda superior do tubo.

Este momento foi dado como tempo de início do ensaio, onde foram cronometrados cinco tempos de 1 minuto e cinco tempos de 5 minutos para a realização de um ensaio, com pequenos intervalos entre os tempos de ensaio para fazer a anotação dos dados.

Ao final de cada um desses tempos realizou-se novamente o preenchimento do furo e o ajuste da vazão (Q), necessária para manter o nível d'água constante na borda superior do tubo acoplado. Essa vazão era medida com o auxílio de duas provetas graduadas de 1000 mililitros, onde foi verificado que ela variava conforme se davam os tempos de ensaios, diminuindo gradativamente em poucas proporções. Os valores das vazões foram obtidos pela Equação (3.1).

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3.1)$$

Onde: Q = vazão atuante;

V = volume de água injetado no furo durante o tempo de ensaio;

t = tempo de ensaio.

Com o furo de 15 metros de profundidade ensaiado, iniciou-se a saturação de 24 horas no furo de 8 metros cujos procedimentos seguintes de ensaio foram os mesmos utilizados anteriormente, possibilitando a coleta de dados de volume (V) nos tempos estipulados.

Após o término do ensaio no furo de 8 metros de profundidade, teve início o período de saturação no furo de 2 metros de profundidade com o auxílio de uma mangueira durante 24 horas. No dia seguinte, esta cota foi ensaiada aplicando a mesma metodologia aplicada nos ensaios dos furos de 15 e 8 metros de profundidade.

Para cada um dos três furos foram realizados três ensaios totalizando quinze tempos de 1 minuto e quinze tempos de 5 minutos.

3.1.7 Cálculo do coeficiente de permeabilidade

Após a realização dos ensaios, foram feitos os cálculos para determinação do coeficiente de permeabilidade, aplicando os dados coletados na Equação (2.8), seguindo a metodologia apresentada pela ABGE (1996).

$$k = \frac{Q}{h} \frac{1}{Cu.r} \quad (2.8)$$

Onde: k = coeficiente de permeabilidade;

Q = vazão de água injetada;

h = profundidade da coluna d'água;

r = raio do furo;

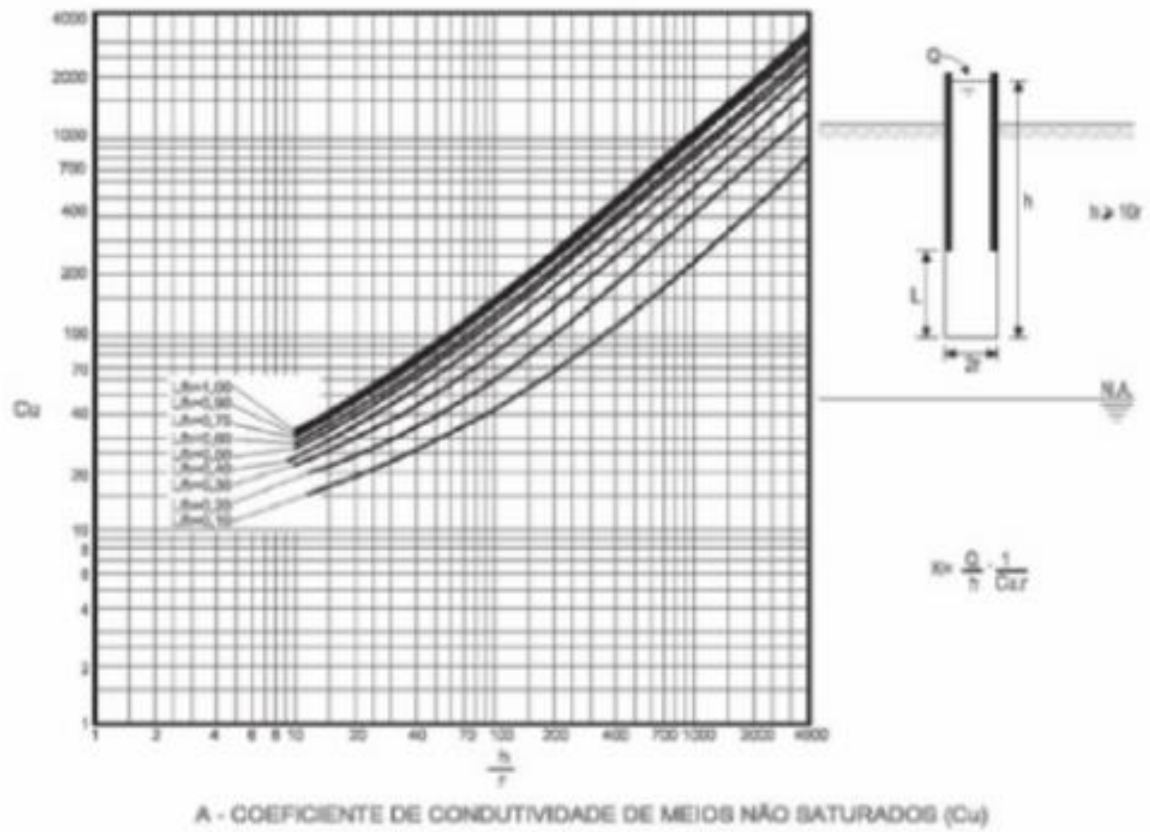
Cu = coeficiente de condutividade;

Tu = profundidade do nível d'água;

L = profundidade do furo.

O coeficiente de condutividade (Cu) é configurado mediante análise do ábaco de condutividade em meios não saturados disposto na Figura (3.4), onde são aplicados os valores de área de percolação lateral e de fundo de cada furo. Haja visto que para determinação do valor da profundidade do furo (L), deve ser desconsiderado a altura do tubo de acoplamento utilizado com o intuito de facilitar o controle do nível d'água (ABGE, 1996).

Figura 3.3 – Ábaco para obtenção do coeficiente de condutividade.



Fonte: ABGE (1996).

CAPÍTULO 4

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1.1 Vazão média

Em cada um dos três furos foram realizados os ensaios de permeabilidade pelo método de infiltração. A análise do fluxo de água, ao longo da profundidade do solo residual, tem como base os valores de vazão obtidos nos ensaios através de uma relação matemática entre o volume d'água e o tempo de ensaio.

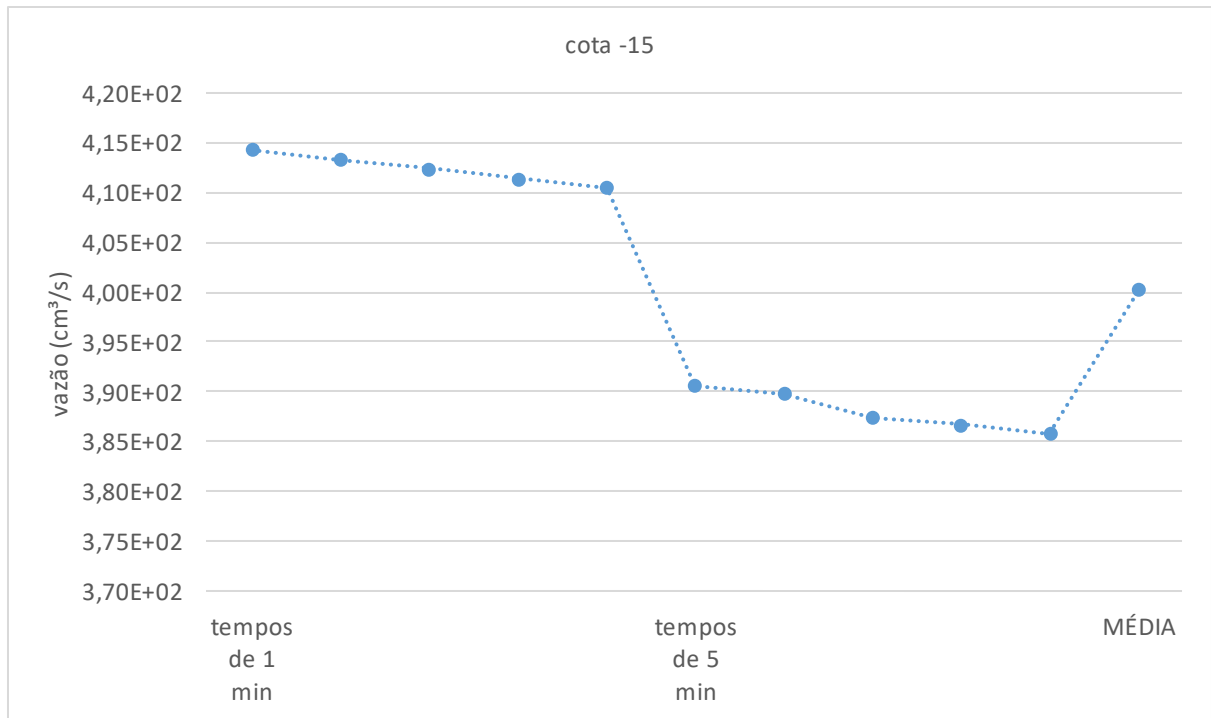
De fato, o nível freático não foi interceptado na execução destes furos, nem ao menos na realização dos ensaios de sondagem SPT no mesmo local de estudo, conforme o laudo disposto no Anexo (3).

O solo em estudo encontrava-se em estado não saturado, em razão de ser verificado baixa precipitação chuvosa nos últimos quinze dias que haviam passado, considerando a data de realização dos ensaios. O clima apresentava-se estável, em condições ensolaradas e com variação da temperatura entre 22 °C e 31 °C, durante os dias em que foram realizados os ensaios.

Cada ensaio foi realizado em um período de aproximadamente 30 minutos. Com a execução do primeiro ensaio no furo de 15 metros de profundidade, verificou-se a necessidade de efetuar intervalos de 30 minutos entre um ensaio e outro, haja visto que no período de saturação inicial o meio ensaiado teria 24 horas para se estabilizar, após esse período, como a vazão aplicada no furo era constante durante as 24 horas, o nível d'água estava posicionado alguns metros abaixo do nível do terreno. Dessa maneira, o meio ensaiado poderia se estabilizar com um intervalo de 30 minutos até que se iniciasse outro ensaio.

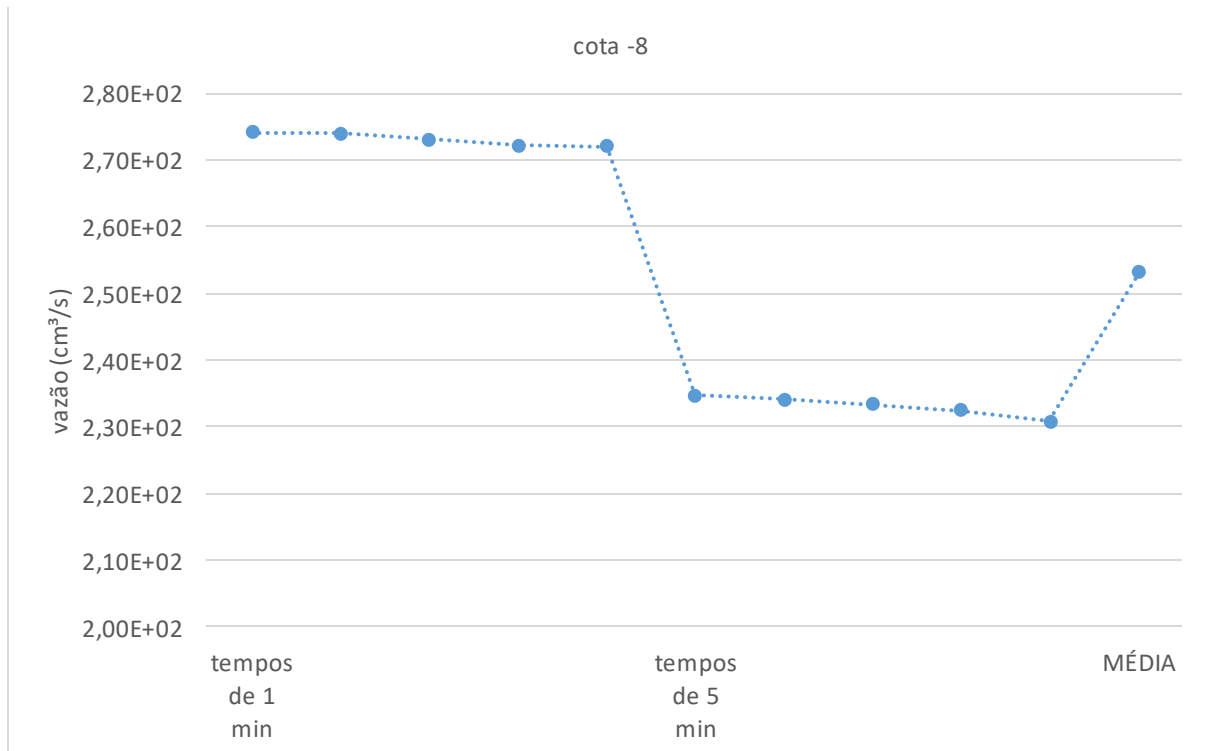
Inicialmente, foi feita uma média aritmética simples entre os valores de vazão para que se pudesse ter um resultado relativo a todos os tempos de ensaio, aplicados em cada furo. No Gráfico (4.1), no Gráfico (4.2) e no Gráfico (4.3) estão dispostos os valores médios de vazão obtidos nos furos ensaiados.

Gráfico 4.1 – Valores das vazões obtidas no furo de sondagem com 15 metros de profundidade.



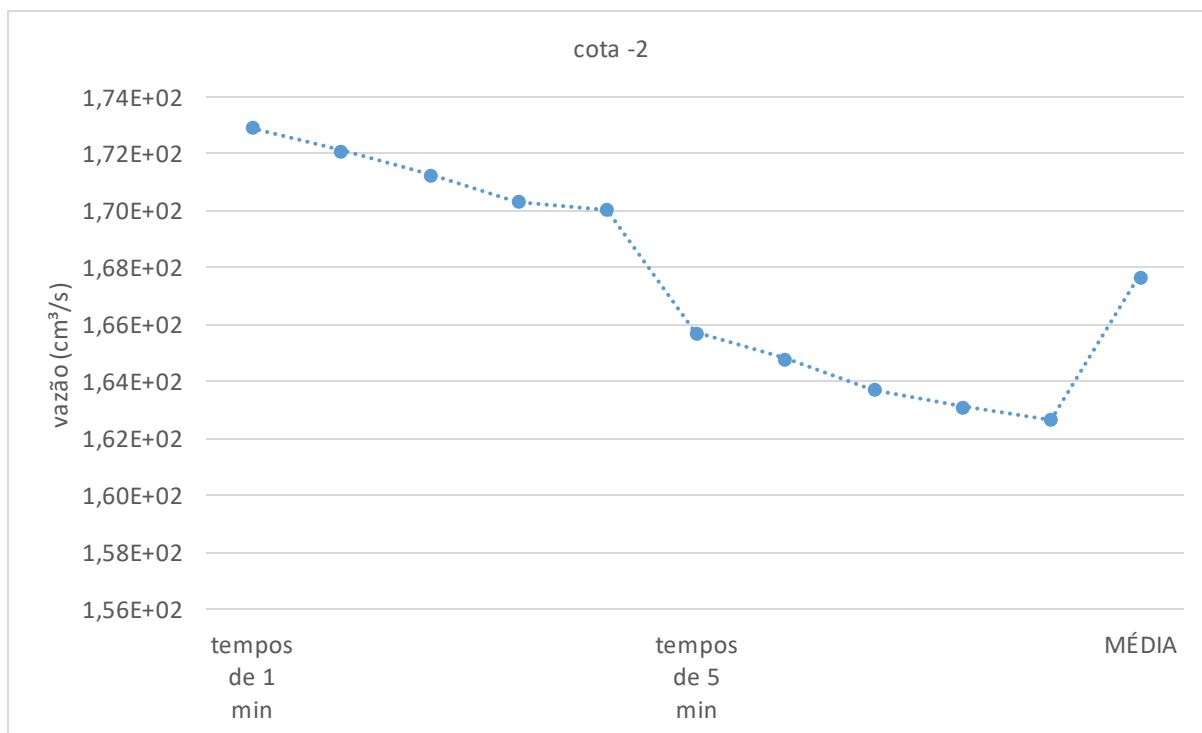
Fonte: Autor, 2016.

Gráfico 4.2 – Valores das vazões obtidas no furo de sondagem com 8 metros de profundidade.



Fonte: Autor, 2016.

Gráfico 4.3 – Valores das vazões obtidas no furo de sondagem com 2 metros de profundidade.



Fonte: Autor, 2016.

Analisando os valores de vazão (Q) obtidos, percebe-se que no decorrer dos ensaios, eles diminuíam gradativamente. Segundo Pinto (2006), com o aumento do grau de saturação, valor proporcional aos níveis de injeção de água no meio ensaiado, as quantidades de ar contidas no entorno de um meio não saturado, que até então constituíam obstáculos à percolação, passam a ser ocupadas por moléculas de água em função da tensão exercida pela coluna d'água.

Observa-se também que os valores de vazão, não tem aumento proporcional a profundidade do furo. No furo de 2 metros a vazão média obtida é de $1,68E+02 \text{ cm}^3/\text{s}$ e para o furo de 15 metros esse valor é 2 vezes maior, sendo que a profundidade é maior em 7,5 vezes. De acordo com FANTINATTI et al. (2006), a diferença organizacional da estratificação de um solo pode se alternar, favorecendo um fluxo horizontal menor ao longo da profundidade das camadas.

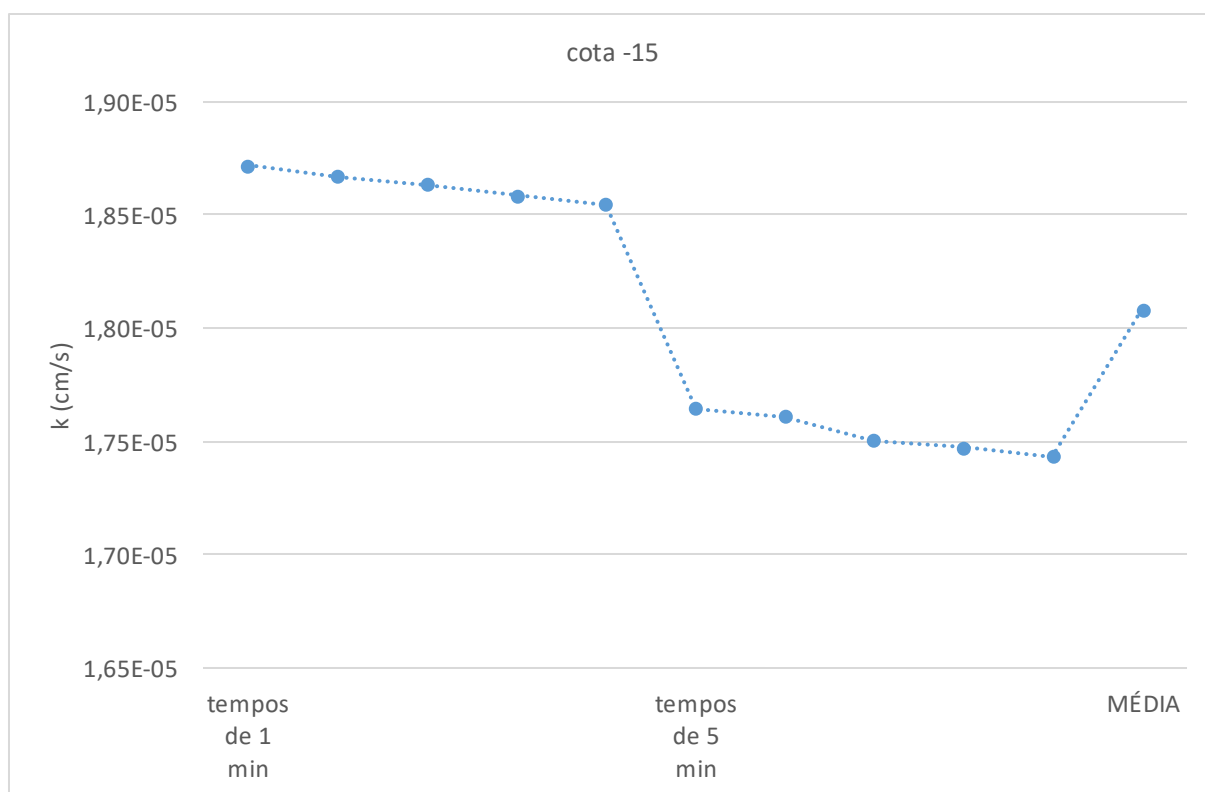
4.1.2 Coeficiente de permeabilidade

Segundo Mello e Teixeira (1967), a presença de bolhas de ar na estrutura de um solo, mesmo em pequenas quantidades, dificulta a percolação de água pelos poros, resultando então

em números crescentes para a permeabilidade à medida em que o solo tende a ser saturado, abordando o grau de saturação como um fator de alta influência na permeabilidade.

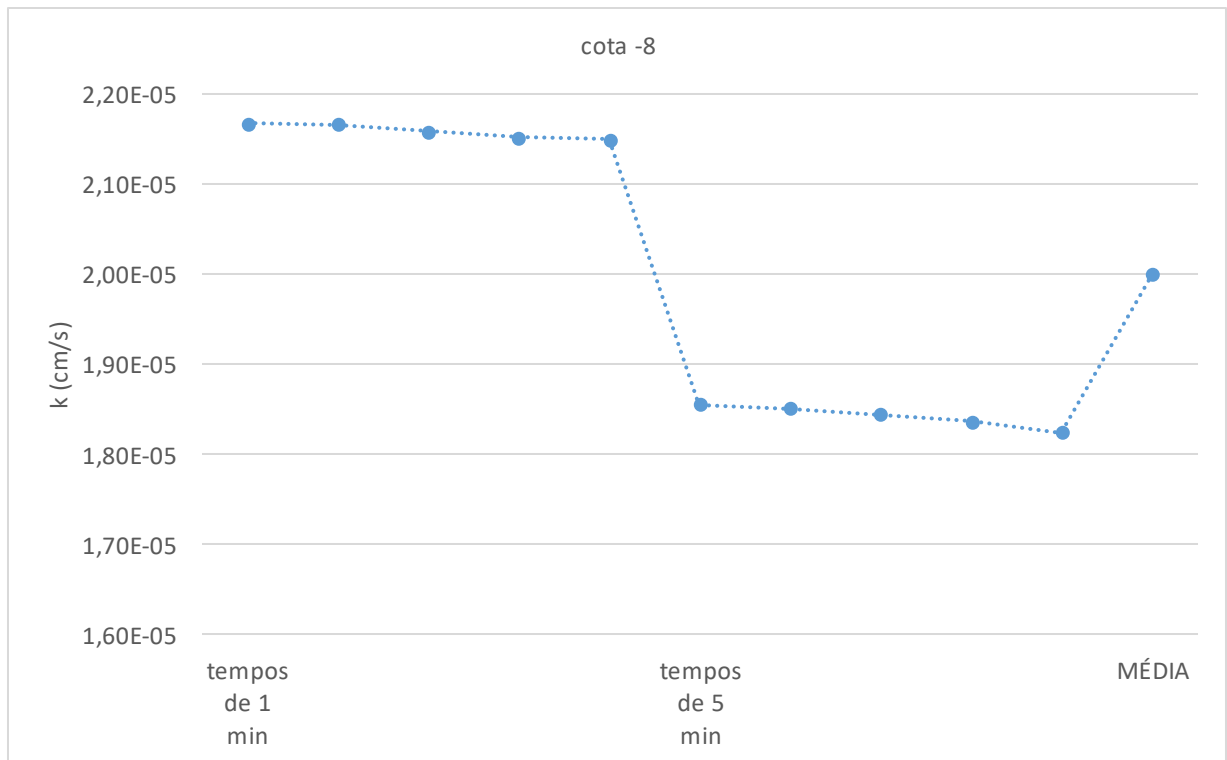
Com a vazão característica de cada furo, foi obtida a média do coeficiente de permeabilidade dos três furos ensaiados. Obtendo-se o valor de $1,81\text{E-}05$ cm/s para o furo de sondagem de 15 metros de profundidade conforme o Gráfico (4.4), resultado sem variação considerável comparando-se com o coeficiente de permeabilidade médio do furo de 8 metros, que resultou em $2,00\text{E-}05$ cm/s, de acordo com o Gráfico (4.5). Já para a permeabilidade média do furo de sondagem de 2 metros de profundidade, valor característico de $5,20\text{E-}05$ cm/s pode ser observado no Gráfico (4.6).

Gráfico 4.4 – Valores dos coeficientes de permeabilidade obtidos no furo de sondagem com 15 metros de profundidade.



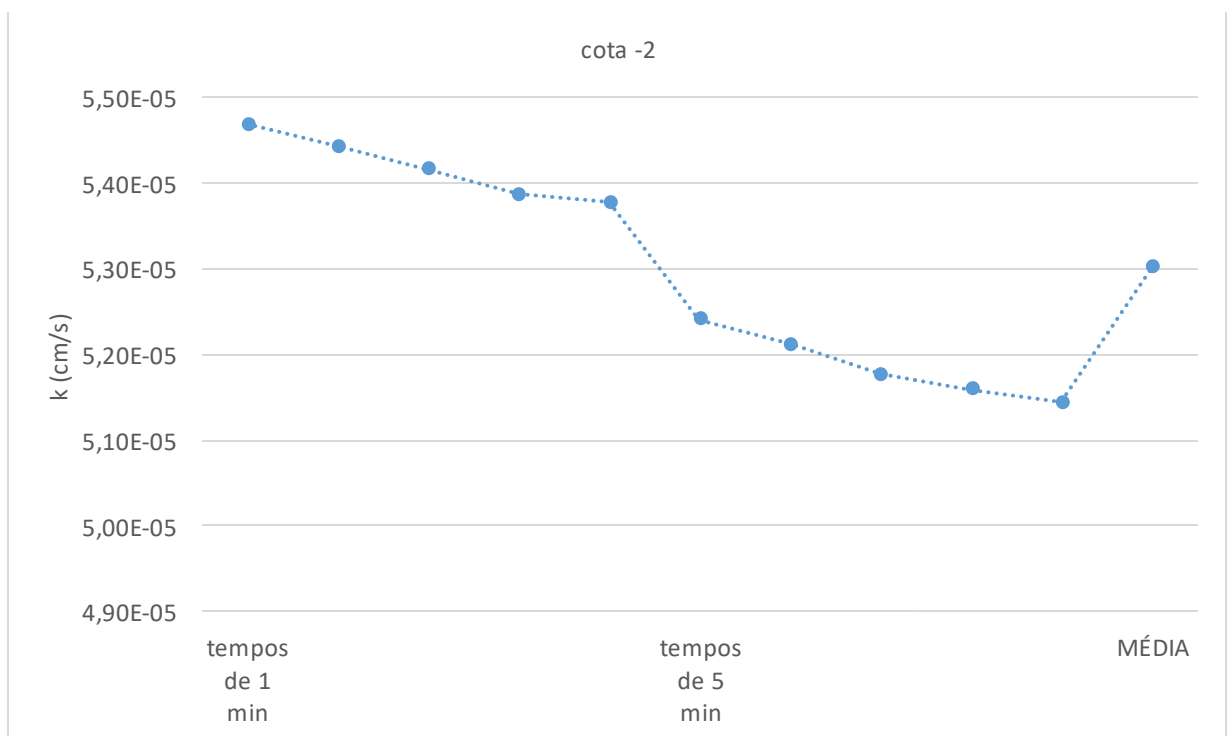
Fonte: Autor, 2016.

Gráfico 4.5 – Valores dos coeficientes de permeabilidade obtidos no furo de sondagem com 8 metros de profundidade.



Fonte: Autor, 2016.

Gráfico 4.6 – Valores dos coeficientes de permeabilidade obtido no furo de sondagem com 2 metros de profundidade.



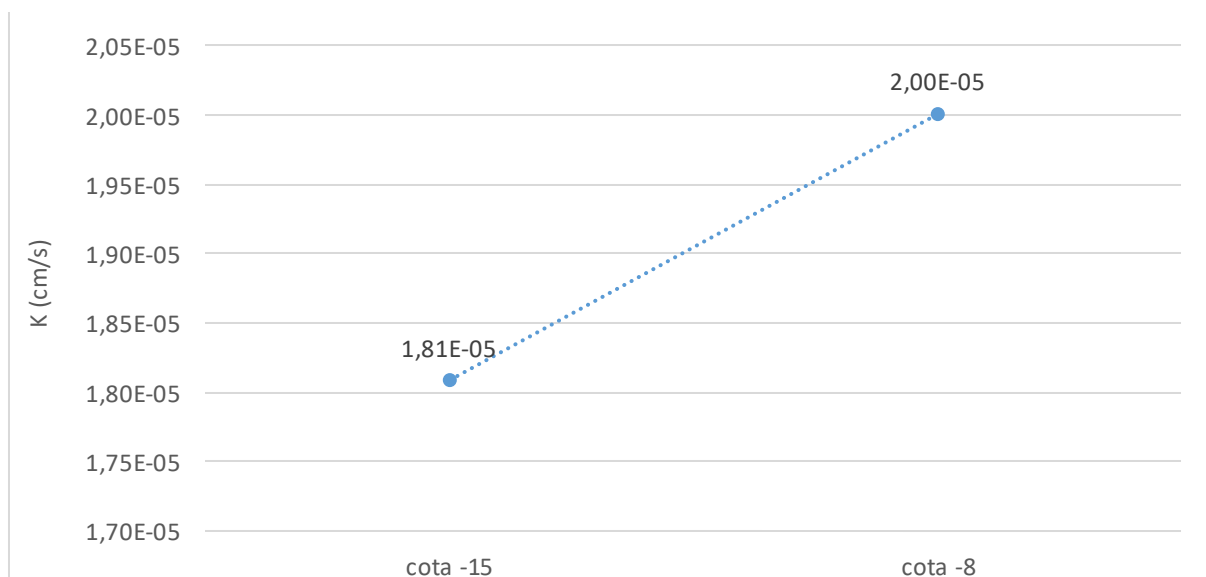
Fonte: Autor, 2016.

Observa-se que conforme se dão os tempos de ensaio nos resultados acima, os valores para o coeficiente de permeabilidade diminuem gradativamente, com maior valor de variação no momento em que passam a ser aplicados os tempos de 5 minutos. Essa variação ocorre devido a influência do grau de saturação, que aumenta conforme as moléculas de água vão ocupando os vazios que compõe a estrutura do solo (CAPUTO, 1996).

Comparando essas variações dos valores de permeabilidade no momento em que passam a ser aplicados os tempos de 5 minutos, pode-se observar que nos resultados relativos aos ensaios do furo de 2 metros de profundidade a variação é expressa por um valor maior, em razão do meio estar sujeito à atuação de uma vazão de mesma ordem medida nos furos de 15 e 8 metros, porém a área de atuação é muito menor do que a dos outros dois furos ensaiados.

Entre os valores médios resultantes obtidos nos furos de sondagem de 15 e 8 metros há uma diferença mínima, conforme apresentado no Gráfico (4.7). Relacionando os valores médios obtidos nos três furos ensaiados, de acordo com o Gráfico (4.8), observa-se alta variação do coeficiente k ao longo da profundidade, haja visto que o valor médio para o furo de 2 metros que resultou em $5,30\text{E-}05 \text{ cm/s}$ ser três vezes maior que o valor resultante no furo de 15 metros de profundidade, expressado na ordem de $1,81\text{E-}05 \text{ cm/s}$.

Gráfico 4.7 – Variação do coeficiente de permeabilidade dos furos de sondagem com 15 e 8 metros de profundidade.

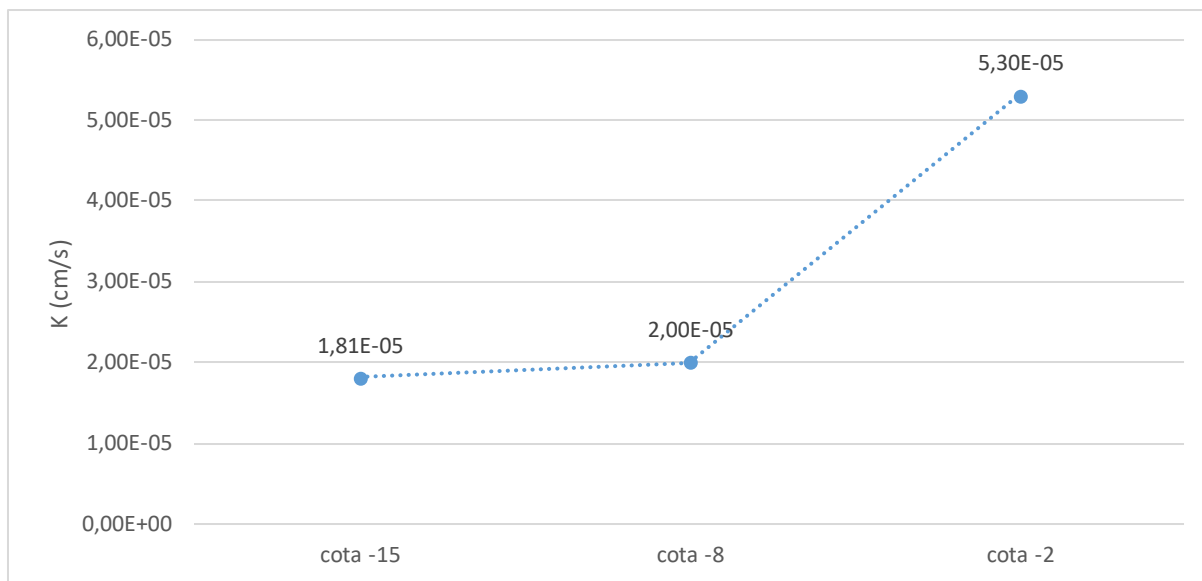


Fonte: Autor, 2016.

Essa variação ocorre em virtude da área de influência dos furos ensaiados. A altura da coluna d'água (h) atuante nos ensaios do furo com 15 metros era quatorze vezes maior do que

a atuante no furo de 2 metros de profundidade, em razão de ser desconsiderado 1 metro do tubo de acoplamento para aplicação destes valores na Equação (2.8). Como se tratam de valores inversamente proporcionais, pode-se observar a influência da altura da coluna d'água (h) nos valores resultantes, de acordo com o Gráfico (4.8).

Gráfico 4.8 – Variação do coeficiente de permeabilidade dos furos de sondagem com 15, 8 e 2 metros de profundidade.



Fonte: Autor, 2016.

Comparando os valores dos ensaios com os valores bibliográficos apresentados na Tabela (2.2), onde é determinada a permeabilidade para solos silte argilosos sendo menor que 10^{-5} cm/s, observa-se que, mesmo com uma certa variação, os valores da permeabilidade resultantes dos ensaios condizem com as características pedológicas do solo local que segundo Damin (2012) é predominantemente composto por argila.

Analisando a curva de variação apresentada no Gráfico (4.8) de maneira genérica, observa-se que, os resultados obtidos nos ensaios seguem os parâmetros apresentados por Caputo (1996), onde a permeabilidade é expressa como um coeficiente que tem variações decrescentes conforme o avanço da profundidade de análise, haja visto que o índice de vazios do solo superficial tende a ser maior que o do subsolo devido a tensão que o solo está submetido.

Um fator atuante que deve ser mencionado, ao analisarmos pelo ponto de vista estrutural, é a disposição das camadas que compõem o solo local. Tendo em vista que a partir dos intermédios da cota -8 metros, inicia-se uma transição de camadas onde o solo passa a ter características de argila rija/dura. A partir dessa transição de camadas, a composição

organizacional das partículas se altera com relação ao solo superficial. Com menos espaços vazios entre as partículas de solo, há menos espaço para percolação de água e consequentemente menor serão os valores de coeficiente de permeabilidade.

Com relação ao grau de permeabilidade do solo respectivo ao seu coeficiente de permeabilidade, comparando os resultados obtidos com os valores bibliográficos dispostos na Tabela (2.3), observa-se que o solo local pode ser caracterizado como muito baixo considerando o funcionamento de sumidouros, em razão de que todos os valores de coeficiente de permeabilidade obtidos nos ensaios serem iguais à ordem de 10^{-5} cm/s.

Na comparação entre os valores resultantes dos ensaios e outros dados bibliográficos, solos evoluídos pedologicamente e solos residuais que apresentam estruturas com macroporos, meio onde a água pode percolar com maior facilidade, mesmo que as partículas sejam pequenas, os vazios entre as aglomerações das partículas são grandes (BUENO e VILAR, 1979).

Segundo Pinto (2006), um solo arenoso fino, como o que predomina toda área do Estado de São Paulo, apresenta no seu estado natural, permeabilidade da ordem de 10^{-3} cm/s. Já caso a estrutura seja desfeita mecanicamente e o solo for recolocado em laboratório com o mesmo índice de vazios, a permeabilidade não será a mesma, ela diminuirá em uma proporção de cem vezes. Se este mesmo solo for submetido a ensaios de compactação, o seu coeficiente de permeabilidade será expresso na ordem de 10^{-6} cm/s a 10^{-7} cm/s.

Mello e Teixeira (1967), também apresentam valores comparativos de coeficiente de permeabilidade, caracterizando-os na ordem de 10^{-10} e 10^{-11} cm/s para a permeabilidade identificada em concretos com bom traço e sem fissuras.

Em análise de solos empregados para impermeabilização de aterros sanitários de resíduos sólidos no Estado de Santa Catarina, Santo (2010) apresenta os valores de permeabilidade na ordem de 10^{-6} e 10^{-7} cm/s. Tendo em vista que estes valores foram obtidos em solos que tiveram sua estrutura natural alterada por processos mecânicos aplicados, estes aterros realizam uma devida impermeabilização com relação ao solo natural.

Na caracterização da permeabilidade do solo da região de Ijuí-RS, Dieimer (2008) obteve o valor de 10^{-5} cm/s para amostras indeformadas do solo homogêneo com frações acima de 60% de argila na sua composição. Para as amostras compactadas, os valores médios de coeficiente de permeabilidade obtidos foram na ordem 10^{-5} cm/s.

CAPÍTULO 5

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista o estudo realizado para o desenvolvimento desta pesquisa, cujo objetivo era analisar através de ensaios *in situ* a variação da permeabilidade ao longo da profundidade de solo residual do Campo Experimental do Centro Universitário Assis Gurgacz em Cascavel-PR, caracterizando com sucesso valores médios para o coeficiente de permeabilidade (k) ao longo da profundidade, analisando duas camadas de solo conforme sondagens SPT realizadas anteriormente a campanha destes ensaios.

Os resultados obtidos mantiveram os fatores característicos revisados em literatura, onde o solo local é apontado como sendo composto por argila e porções de silte. Todos os valores resultantes para a permeabilidade são iguais à ordem de 10^{-5} cm/s, linha tipicamente determinada para solos silte argilosos em bibliografias como Pinto (2006), Mello e Teixeira (1967), Caputo (1996).

Com valor característico inferior a ordem de 10^{-5} m/s, padrão abordado por Lambe e Whitman (1976) *apud* Neto (2007) para solos de características semelhantes ao solo estudado, os valores médios dos coeficientes de permeabilidade obtidos nos ensaios foram expressados na ordem de 10^{-5} cm/s e 10^{-6} cm/s. Observa-se também que, a partir dos valores de coeficiente de permeabilidade resultantes, pode-se caracterizar o grau de permeabilidade do solo local, sendo este muito baixo, considerando o funcionamento de sumidouros.

Analizando esta pesquisa, de modo geral, percebe-se ao executar ensaios ao longo da profundidade de um solo, os resultados obtidos podem apontar variações que até então não seriam identificadas se os furos ensaiados fossem de mesma cota. A análise ao longo da profundidade permite que se obtenha variações do coeficiente de permeabilidade que são influenciadas por fatores como a disposição das camadas de solo e estrutura dos grãos, por exemplo.

Os dados resultantes dos ensaios realizados neste estudo poderão ser utilizados na execução de projetos de engenharia comumente aplicados na cidade de Cascavel - PR, tais como controle de percolação de água em escavações, no dimensionamento de sumidouros de água de chuva e de drenagens. Haja visto que por se tratar de dados obtidos em campo, representam condições reais e características do solo estudado.

CAPÍTULO 6

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em sugestão para continuação desta pesquisa, indica-se a realização de ensaios de laboratório para caracterização do coeficiente de permeabilidade por métodos diretos de análise. A partir da obtenção dos dados laboratoriais de permeabilidade, pode-se realizar um comparativo com os resultados deste estudo, apontados aspectos de importância para os ensaios de laboratório.

Também pode ser realizada uma pesquisa com utilização da mesma metodologia, porém aplicada em um solo de diferente composição, proporcionando assim adequação destes métodos em solos arenosos, por exemplo.

Para o mesmo solo local, recomenda-se metodologias relativas a ensaios de permeabilidade em cavas de análise, verificando se haveriam diferenças significativas nos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA – ABGE. 1996. Ensaio de permeabilidade em solos, orientações para sua execução no campo. **BOLETIM 04**. São Paulo-SP.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. 2000. Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável; **NBR 14545/2000**, Rio de Janeiro-RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. 1993. Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos; **NBR 7229/1993**, Rio de Janeiro-RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. 2000. Rochas e solos; **NBR 6502/1995**, Rio de Janeiro-RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. 2001. Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio; **NBR 6484/2001**, Rio de Janeiro-RJ.

BUENO, B. S.; VILAR, O.M. **Mecânica dos solos**. São Carlos: EESC-USP, São Carlos-SP, 1979.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**. Volumes 1. Editora: LTC. Rio de Janeiro-RJ, 1996.

CORRÊA, E. L. – **Comparação entre parâmetros de resistência obtidos em ensaios triaxiais e por meio de correlações empíricas pelo ensaio spt, no campus do Centro Universitário Assis Gurgacz, em Cascavel/PR**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade Assis Gurgacz – Graduação em Engenharia Civil – Cascavel-PR, 2015.

COSTA, L. D. – **Determinação da eficiência do ensaio SPT através de prova de carga estática sobre amostrador padrão**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade Assis Gurgacz – Graduação em Engenharia Civil – Cascavel-PR, 2014.

DAMIN, E. **Aplicação do modelo CAM-CLAY modificado ao solo de Cascavel-Pr.** Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade Assis Gurgacz – Graduação em Engenharia Civil – Cascavel-PR, 2012.

DEPARTAMENTO ESTADUAL DE INFRA-ESTRUTURA DE SANTA CATARINA – DEINFRA/SC. 1994. Instruções normativas para execução de sondagens; **IN-09/94**, Florianópolis-SC.

DEPARTAMENTO ESTADUAL DE INFRA-ESTRUTURA DE SANTA CATARINA – DEINFRA/SC. 1994. Instruções normativas para execução de sondagem a trado; **IN-04/94**, Florianópolis-SC.

DIAS, C.O. **Determinação da condutividade hidráulica de solos não saturados.** Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal do Paraná – Mestrado em Geotecnia – Curitiba-PR, 2012.

DIEMER, F. **Estudo da permeabilidade do solo da região de Ijuí-RS percolando água e óleo diesel.** Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – Graduação em Engenharia Civil – Ijuí-RS, 2008.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Brasília: EMBRAPA, 2006.

FANTINATTI, P.H.A.; FANTINATTI NT., F.P., TIBANA, S. ALMEIDA, F.T. **Ensaio de Permeabilidade In Situ em Solos Saturados.** In II GeoJovem, Universidade Estadual do Norte Fluminense – Rio de Janeiro-RJ, 2006.

FURTINI, M. B. **Permeabilidade do solo na sub-bacia do córrego centenário, Lavras, MG, em apoio às legislações das cidades.** Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras – Doutorado em Engenharia Agrícola. Lavras-MG, 2009.

HILLEL, D. **Environmental Soli Physics.** San Diego: Academic Press, 1998.

IBGE. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Manual Técnico de Pedologia**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2007.

GIACHETI, H. L.; FERREIRA, C. V.; LOBO, A. S.; MARQUES, M. E. M. **A condutividade hidráulica de um solo arenoso, determinada a partir de ensaios de campo e de laboratório**, In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Porto Alegre – RS, dezembro de 2000. ABES, 2000.

GONÇALVES, R. L. **Estudos do comportamento de estacas apioladas em solo colapsível da região de Londrina-PR**. Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Londrina – Mestrado em Edificações e Saneamento – Londrina-PR, 2006.

GUTIERREZ, N. H. M. **Influências de aspectos estruturais no colapso de solos do norte do Paraná**. Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – Doutorado em Geotecnia – São Carlos-SP, 2005.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MCCARTNEY, J. S.; ZORNEBERG, J. G. **Centrifuge permeameter for unsaturated soil II: theoretical basics and experimental developments**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Posted ahead of print, january 8, 2010.

MELLO, V. F. B.; TEIXEIRA, A. H. **Mecânica dos solos**. São Carlos: EESC-USP, São Carlos-SP, 1962.

NETO, F. P. F. **Estudo do transporte de contaminantes na área de disposição de resíduos sólidos da cidade de campos dos Goytacazes – RJ**. Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Norte Fluminense – Mestrado em Engenharia Civil – Campos dos Goytacazes-RJ, 2007.

NEVES, M. **Estudo da permeabilidade do solo colapsível da região de São Carlos**. Dissertação apresentada à Universidade de São Paulo – Mestrado em Geotecnia – São Carlos-SP, 1987.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Ed. Villibor, 1995.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RIBEIRO, R. A. V. **Avaliação do desempenho hidráulico de barreiras de proteção ambiental produzidas com solos laterítico arenoso compactado, estabilizado quimicamente**. Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista – Mestrado em Engenharia Civil – Ilha Solteira-SP, 2002.

SAMPAIO, F. M. T. **Permeabilidade superficial de solos da sub-bacia do córrego centenário da cidade de Lavras-MG**. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras – Mestrado em Engenharia Agrícola – Lavras-MG, 2004.

SANTOS, G. S. **Estudo da permeabilidade em barreiras de impermeabilização**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual de Feira de Santana – Graduação em Engenharia Civil – Feira de Santana-BA, 2010.

ZORZI, C. – **Caracterização dos solos tropicais lateríticos para reforço de pavimento**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade São Francisco – Graduação em Engenharia Civil – Itatiba-SP, 2008.

.

ANEXOS

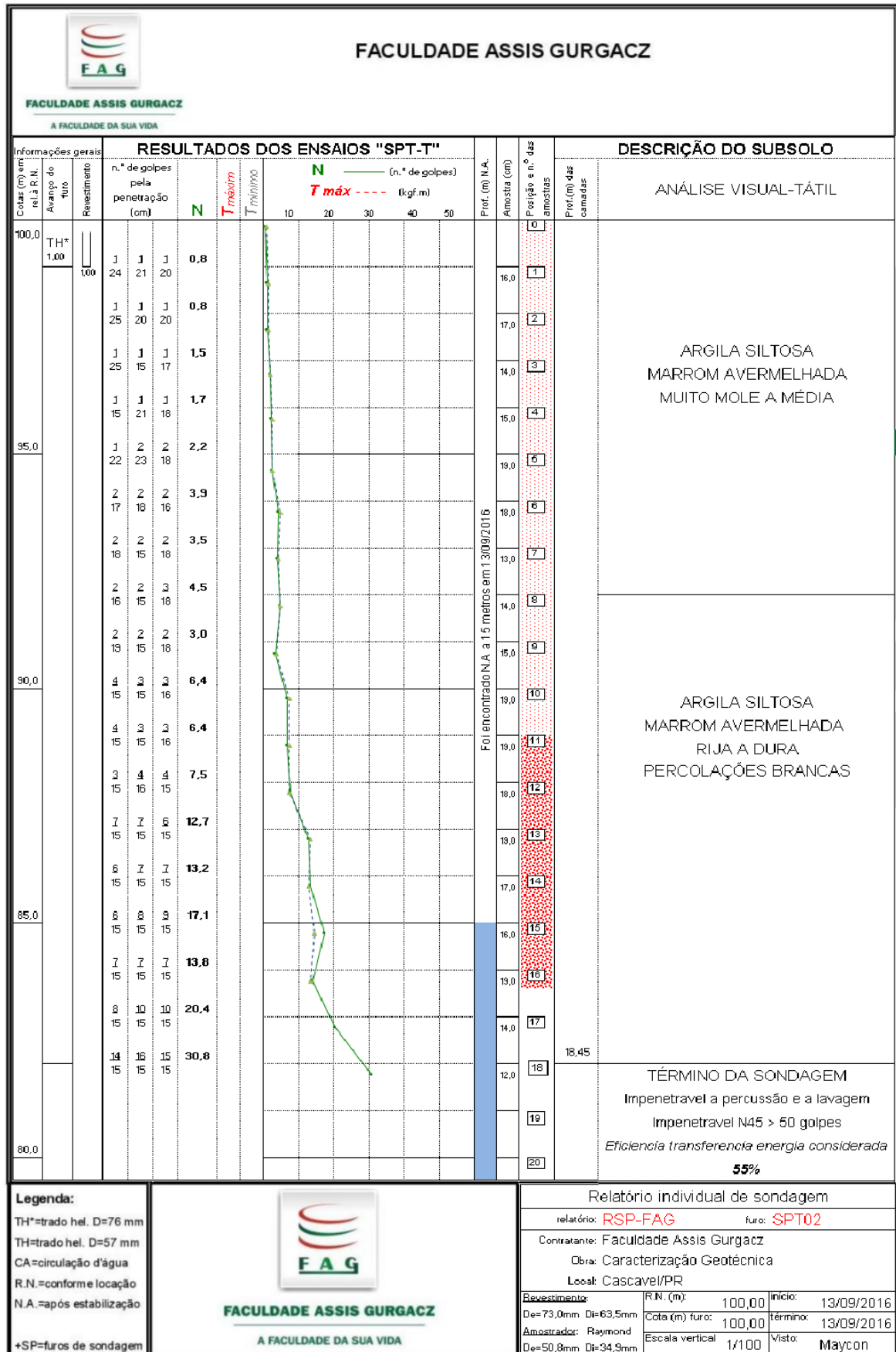
ANEXO 01– Laudo de sondagem realizado no solo do Centro Universitário AG, Cascavel/PR.

 FACULDADE ASSIS GURGACZ A FACULDADE DA SUA VIDA																	
Informações gerais			RESULTADOS DOS ENSAIOS "SPT-T"										DESCRÇÃO DO SUBSOLO				
Cota (m) em rel. à R.N.	Avanço do furo	Revestimento	n.º de golpes pela penetração (cm)			N	T _{máximo}	T ₁₅	N — (n.º de golpes) T _{máx} ---- (kgf.m)			Prof. (m) N.A.	Amostra (cm)	Posição e n.º das amostras	Prof. (m) das camadas	ANÁLISE VISUAL-TÁTIL	
100,0	TH*	1,00	0,4	0,4	0,4	0,9											ARGILA SILTOSA MARROM AVERMELHADA MUITO MOLE A MÉDIA
			15	15	15												
			0,4	0,4	0,4	0,9											
			15	15	15												
			0,4	0,4	0,4	0,9											
			15	15	15												
			0,4	0,4	0,4	0,9											
			15	15	15												
			0,4	0,4	0,4	0,9											
			15	15	15												
95,0	TH		0,4	0,9	1,3	2,2											ARGILA SILTOSA MARROM AVERMELHADA RIJA A DURA PERCOLAÇÕES BRANCAS
			15	15	15												
			1,8	1,8	2,2	4,0											
			15	15	15												
			1,3	1,3	1,3	2,6											
			15	15	15												
			0,9	0,9	0,9	1,8											
			15	15	15												
			2,2	2,6	2,6	5,3											
			15	15	15												
90,0			2,6	3,1	3,1	6,2											TERMINO DA SONDAGEM
			15	15	15												
			3,1	3,6	4	7,5											
			15	15	15												
			4	4,9	5,3	10,1											
			15	15	15												
			5,3	6,6	6,6	13,2											
			15	15	15												
			7,6	7,6	7,9	15,4											
			15	15	15												
85,0			9,3	9,7	10	19,9											
			15	15	15												
80,0																	

Foi encontrado a 12 metros em 10/11/2014

Legenda:		 FACULDADE ASSIS GURGACZ A FACULDADE DA SUA VIDA		Relatório individual de sondagem			
TH*=trado hel. D=76 mm TH=trado hel. D=57 mm CA=circulação d'água R.N.=conforme locação N.A.=após estabilização +SP=furos de sondagem				relatório: RSP- FAG furo: SPT01 Contratante: Faculdade Assis Gurgacz Obra: Caracterização Geotécnica Local: Cascavel/PR			
				Revestimento: R.N. (m): 100,00 início: 10/11/2014 De=73,0mm Di=63,5mm Cota (m) furo: 100,00 término: 10/11/2014 Amostrador: Raymond Escala vertical: 1/100 Visto: Maycon De=50,8mm Di=34,9mm			

ANEXO 02– Laudo de sondagem realizado no solo do Centro Universitário AG, Cascavel/PR.



ANEXO 03– Laudo de sondagem realizado no solo do Centro Universitário AG, Cascavel/PR.

