

**FACULDADE ASSIS GURGACZ
RODRIGO LUCIANO CASAGRANDE**

**INFLUÊNCIA DA COMPACTAÇÃO NA PERMEABILIDADE DO SOLO
SUPERFICIAL LATERÍTICO DE CASCAVEL/PR, ATRAVÉS DA INFILTRAÇÃO DE
CHORUME.**

**CASCAVEL - PR
2017**

**FACULDADE ASSIS GURGACZ
RODRIGO LUCIANO CASAGRANDE**

**INFLUÊNCIA DA COMPACTAÇÃO NA PERMEABILIDADE DO SOLO
SUPERFICIAL LATERÍTICO DE CASCAVEL/PR, ATRAVÉS DA INFILTRAÇÃO DE
CHORUME.**

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 Almeida**

CASCAVEL - PR

RESUMO

A produção de resíduos sólidos e sua deposição em aterros sanitários interfere na qualidade do meio ambiente devido a fatores diversos, dentre eles, a produção de chorume. O trabalho foi desenvolvido com o objetivo de verificar o coeficiente de permeabilidade do solo natural e compactado utilizando chorume como material percolado. Foi realizado o ensaio de permeabilidade de carga variável conforme a NBR 14545/00 utilizando o método B com amostras indeformadas coletadas da profundidade de 1 metro do campo experimental de Engenharia da FAG. O solo estudado possui comportamento laterítico e colapsível, com alta porosidade e concentração de óxido de alumínio e de ferro. Os ensaios foram conduzidos no laboratório de Mecânica dos Solos do Centro Universitário Assis Gurgacz, sendo o material utilizado retirado da primeira camada de solo do Campo Experimental da FAG. A segunda amostra consistiu no mesmo solo, porém compactado sob energia normal pelo ensaio de Proctor, conforme a NBR 7182, na umidade ótima. A amostra de chorume bruto foi proveniente do aterro sanitário da cidade de Cascavel. Constatou-se uma grande redução na velocidade de percolação do chorume no solo compactado, resultado que foi de uma grande melhora no coeficiente de permeabilidade da amostra compactada, considerado como satisfatório de acordo com estudos realizados em literaturas.

Palavras Chave: Coeficiente de permeabilidade, Chorume, Percolação de chorume.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Esquema de um permeâmetro de carga constante	
Figura 2:	Esquema de permeâmetro de carga variável	
Figura 3:	Lixão a céu aberto.	
Figura 4:	Imagem de um aterro sanitário	
Figura 5:	Local dos Ensaios.	
Figura 6:	Localização do Município de Cascavel no Estado do Paraná	
Figura 7:	Camisa metálica sendo cravada no solo.	
Figura 8:	Aterro Sanitário de Cascavel-PR.	
Figura: 9	Lagoa de tratamento de chorume bruto do Aterro Sanitário de Cascavel-PR.	
Figura:10	Umidade ótima do solo estudado.	
Figura 11:	Pesagem do solo para obter-se a umidade ótima	
Figura 12:	Mistura de água no solo.	
Figura 13:	Aplicação de Golpes de Soquete.	
Figura 14:	Amostra sendo extraída no macaco hidráulico.	
Figura 15:	Amostra talhada na dimensão desejada.	
Figura 16:	Corpo de prova parafinado.	
Figura 17:	Corpo da prova submerso em água.	
Figura 18:	Corpo de prova isolado com a argila bentonita.	
Figura 19:	Permeâmetro pronto para ser fechado.	
Figura 20:	Permeâmetro conectado nas provetas com chorume.	

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1: Classificação granulométrica dos solos
- Tabela 2: Relação entre a viscosidade da água na temperatura de ensaio e a viscosidade da água a 20°C (RT)
- Tabela 3: Valores do Coeficiente de permeabilidade de solos típicos.
- Tabela 4: Energias de compactação.
- Tabela 5: Valores dos coeficientes de permeabilidade
- Tabela 6: Resultados dos coeficientes de permeabilidade obtidos

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1	Equação para corrigir a temperatura da água nos ensaios de laboratório.
Equação 2.2	Equação de Darcy.
Equação 2.3	Lei de Darcy
Equação 2.4	Velocidade de percolação da água quando o gradiente é igual a um.
Equação 2.6	Cálculo do Valor da permeabilidade.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Variação média do coeficiente de permeabilidade para as cotas -2, -8 e -15 metros.

Gráfico 2: Comparação de variações dos coeficientes de permeabilidade.

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
C:	Centímetro por segundo.
Cl:	Cloro.
DBO:	Demanda Bioquímica de Oxigênio.
DQO:	Demanda Química de Oxigênio.
FAG:	Faculdade Assis Gurgacz.
Fe:	Ferro.
K:	Coeficiente de Permeabilidade.
K20:	Coeficiente de permeabilidade referido à temperatura de 20°.
NBR:	Norma Brasileira.
N-NH3:	Nitrogênio amoniacal.
PEAD:	Geomembrana de Polietileno de Alta Densidade.
PH	Indica a acidez ou basicidade de uma solução aquosa.
PVC:	Policloreto de polivinila.
RT:	Relação entre a viscosidade da água na temperatura de ensaio e a viscosidade da água a 20° C.
SiBCS:	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.

SUMÁRIO

I - CAPÍTULO 1	16
1.1 INTRODUÇÃO	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo Geral	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
1.3 JUSTIFICATIVA	17
1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	18
1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE	18
1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	19
II - CAPÍTULO 2	20
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1.1 Conceituação	20
2.1.2 Solos Residuais	22
2.1.3 Solo Transportado	22
2.1.4 Solo Laterítico	22
2.1.5 Solo Orgânico	23
2.1.6 Solo Colapsível	23
2.2 A ÁGUA NO SOLO. PERMEABILIDADE E POROSIDADE	24
2.2.1 Permeabilidade do Solo	24
2.2.1.1 Fatores que influenciam a permeabilidade do solo	24
2.2.1.2 Valores típicos de Coeficiente de Permeabilidade	25
2.2.2 Determinação do Coeficiente de Permeabilidade ou Condutividade	
Hidráulica	26
2.2.2.1 Permeâmetro de Carga Constante	27
2.2.2.2 Permeâmetro de Carga Variável	28
2.2.3 Porosidade do Solo	30
2.3 Adensamento	31
2.3.1 Analogia do Sistema água-mola de Terzaghi	31
2.4 RESÍDUOS SÓLIDOS E LIXO DOMICILIAR. A PERCOLAÇÃO COM CHORUME	35
2.4.1 Resíduos Sólidos	36
2.4.2 Geração de Chorume e Características Químicas	38

2.4.3 O Solo como Elemento Depurador	39
III - CAPÍTULO 3	41
3.1 METODOLOGIA	41
3.1.1 Especificação da Pesquisa e Localização do Solo Estudado.....	41
3.1.2 Caracterização do solo Local.....	42
3.1.3 Extração de amostras deformáveis e indeformáveis.....	43.
3.1.4 Chorume.....	43
3.1.5 Utilização do Solo como Elemento Depurador.....	44
3.2. ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	44
3.2.1 Ensaio de Compactação para a amostra deformável.....	44.
3.2.2 Umidade Ótima do Solo.....	45
3.2.3 Equipamentos Utilizados	46
3.2.4 Energia de Compactação.....	46
3.2.5 Execução do Ensaio.....	46
3.2.6 Ensaio de permeabilidade de solos argilosos a carga variável.....	48
3.2.7 Cálculo do Coeficiente de Permeabilidade.....	51
3.3 TRABALHOS REALIZADOS.....	52
IV - PÍTULO 4	54
4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
4.1.1 Coeficiente de Permeabilidade.....	54
4.1.2 Comparação com Ensaios já realizados no Campo Experimental.....	54
V - CAPÍTULO 5	56
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
REFERÊNCIAS	57

I - CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento urbano com suas interferências no meio ambiente sendo apontado por estudiosos como causador de modificações na camada superficial do solo terrestre. Neste sentido, o tratamento e destinação dos resíduos sólidos urbanos evidencia-se como um problema para a sustentabilidade do planeta Terra e leva governantes e a sociedade em geral sugerir e buscar estratégias visando garantir a sustentabilidade do planeta.

De acordo com Gomes (2005) a sociedade moderna lança indiscriminadamente ao meio ambiente diversos tipos de dejetos originados pela produção industrial, comercial, hospitalar e residencial que acarretam a degradação ambiental. O aumento de resíduos sólidos e líquidos urbanos favorece a sua disposição em locais como córregos, rios e ou, em terrenos afastados dos centros urbanos originando a formação de outras matérias poluentes do solo e lençóis freáticos, como o chorume.

Sendo assim, o mesmo autor, ressalta que a geração de chorume é questão de maior preocupação quanto à degradação ambiental em um sistema de disposição de resíduos sólidos urbanos, sendo que o gerenciamento inadequado deste percolado pode levar à poluição dos compartimentos ambientais, em particular, o solo, águas superficiais e águas subterrâneas (GOMES, 2005).

Martins *et al* (2002), *apud* Sampaio (2004) ressalta que a permeabilidade é um dos atributos físicos de grande importância para determinar a qualidade do solo, pois ela intervém em diversos problemas práticos relativos à construção civil, mais especificamente naqueles que estão associados com estruturas hidráulicas.

Este trabalho almejou determinar o coeficiente da permeabilidade do solo considerando as situações in natura e com compactação, mediante percolação de chorume pelo seu interior. Os ensaios foram realizados no Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz em Cascavel.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a influencia da compactação no coeficiente de permeabilidade do solo superficial laterítico de Cascavel/PR percolado com chorume, em amostras de solo extraídas do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz, de Cascavel-PR.

1.2.2 Objetivos Específicos

a) Realizar ensaios de laboratório a partir de 2 (duas) amostras de solo coletadas do Campo Experimental do Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz – FAG, percoladas com chorume retirado do aterro sanitário do município de Cascavel, PR.

b) Analisar o coeficiente de permeabilidade de amostras percoladas com chorume.

1.3 JUSTIFICATIVA

As obras de engenharia civil de alguma forma se apoiam sobre o solo, ou, encontram-se no seu interior, ou ainda, utilizam-se do próprio solo como material de construção. Sabe-se, no entanto, que considerável parte do solo é contaminado por poluentes gerados pelos processos industriais e residenciais produzidos pelo homem e depositados em aterros sanitários. Santos (2010) aponta a necessidade de analisar a permeabilidade do solo para qualquer tipo de atividade de engenharia civil a ser realizada, em função do deslocamento e ou movimentação dos solos.

O Ministério do Meio Ambiente (2017) alerta que a concentração desses poluentes ou contaminantes pode ocorrer em subsuperfície nos diferentes compartimentos do ambiente, como por exemplo, no solo, nos sedimentos, nas rochas, nos materiais utilizados para aterrar os terrenos, nas águas.

O chorume é um dos poluentes presentes e que demanda ações de impermeabilização da área. Para Nascimento e outros (2000), a formação de chorume é um sério problema, pois esse líquido produzido pela massa orgânica do lixo durante

o processo de degradação biológica em contato com a água da chuva, que percola a massa do aterro, gera o lixiviado, tóxico, com valores elevados de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e DQO (Demanda Química de Oxigênio), traços de metais dissolvidos e amônia.

Já, as áreas contaminadas são caracterizadas como o terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria que contenha quantidades ou concentrações de quaisquer substâncias ou resíduos em condições que causem ou possam causar danos à saúde humana, ao meio ambiente ou a outro bem a proteger (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2017).

Diante do exposto, justifica-se a presente pesquisa que busca entender a interferência de solos percolados por chorume na construção civil.

1.4 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Para a execução de um aterro é importante conhecer o coeficiente de permeabilidade do solo local a fim de analisar qual os possíveis impactos causados pela percolação de chorume nos seus vazios, e analisar qual a melhor solução para reduzir esse impacto.

Esses critérios de análise levam evidenciam problemas como: qual a resistência que o solo do Campo Experimental de Engenharia da Fag oferece à percolação de chorume por seus vazios ? E como a compactação adequada do solo pode ajudar a prevenir possíveis infiltrações de chorume através de seus vazios?

1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE

Quais interferências a presença de chorume pode apresentar efetivamente, para determinação do solo para a construção civil?

1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

O ensaio será realizado no laboratório de mecânica dos solos do Centro Universitário FAG, Cascavel-PR, com amostras de solo retiradas da primeira camada do Campo Experimental da FAG, onde serão realizados ensaios de permeabilidade utilizando amostras de chorume bruto proveniente do aterro sanitário da cidade de Cascavel/PR. Serão empregadas duas amostras de solo, uma no seu estado natural (in natura) e outra compactada através do ensaio de Proctor, conforme a NBR 7182.

II - CAPÍTULO 2

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 Conceituação

A origem da palavra solo é do latim *solum*, que significa "superfície do chão". Na Engenharia Civil solos são definidos como um aglomerado de partículas provenientes da decomposição das rochas, que podem ser escavados facilmente sem emprego de explosivos e que são utilizados como material de construção ou de suporte para estruturas (SIQUEIRA, 2015).

Fatores genéticos como rocha matriz, relevo, clima, seres vivos e tempo, acrescidos dos efeitos do uso pelo homem contribuem na formação do solo (FASOLO, 1986).

Também para Souza (2015, p. 27),

Solos são materiais resultantes da decomposição das rochas pela ação de agentes de intemperismo. [...] Os fatores importantes nos processos de formação dos solos são rocha de origem, clima, topografia, vegetação e o tempo de atuação dos fatores anteriores. O intemperismo através das ações dos ventos, chuvas e organismos vivos (processos físicos, químicos e biológicos) responsáveis pelo lento processo – calcula-se que cada centímetro do solo se forma em intervalo de tempo de 100 a 400 anos.

GONÇALVES (2014) corrobora com Souza (2015) acerca dos elementos formadores do solo e ressalta que as suas camadas mais profundas são importantes para as obras de engenharia, pois elas “interagem com o meio ambiente e entre elas próprias. Todas as obras possuem uma fundação e assim sempre possuem um vínculo com o solo” (GONÇALVES, p. 2). Assim sendo, enfatiza a autora que:

[...] para a engenharia civil também são importantes as camadas mais profundas, porque as obras são apoiadas sobre ou no interior da crosta terrestre. Para a engenharia civil é chamado de solo o material que pode ser escavado com pá, picareta ou escavadeira e de rocha o material que só pode ser desmontado com a utilização de explosivos (GONÇALVES, p. 4).

Da mesma forma, para Souza (2015), o solo é o material de construção mais antigo e mais comum que o homem dispõe para os diferentes tipos de construção, sendo algumas delas, fundações de obras civis, compactação de solos, estabilização de solos, estabilidade de taludes, erosões, drenagens e túneis. Sendo assim, o solo se torna um componente indispensável para obras de engenharia civil.

A formação do solo, de acordo com Vieira (1988) se dá pela agregação de suas partículas individuais em partículas compostas ou agregados. Essas partículas, segundo Prevedello (1996) apresentam tamanho variado, algumas são grandes e vistas a olho nu; outras são tão diminutas que apresentam propriedades coloidais.

Partículas de pequeno tamanho denominadas primárias, se aglutinam pela ação de numerosas substâncias como matéria orgânica, óxidos de ferro, argila, entre outras, formando partículas secundárias, chamadas de agregados, de vários tamanhos e composições e com vários graus de estabilidade (OLIVEIRA, 2005).

Os valores adotados pela NBR 6502/95 para a classificação do solo através da granulometria são apresentados na Tabela 1.

Tabela1: Classificação granulométrica dos solos.

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	0,002 mm a 0,06 mm
Argila	inferior a 0,002 mm

Fonte: NBR 6502/95.

Quanto à origem, os solos são classificados, em solos residuais, transportados e orgânicos.

Solos orgânicos, de acordo com Pinto (2006) são aqueles que contêm material proveniente da decomposição de origens vegetal e animal, possuindo cor e odor facilmente identificáveis. O autor acrescenta que esses são solos problemáticos por serem muito compressíveis. Possuem elevados índices de vazios e baixa capacidade de suporte.

2.1.2 Solos Residuais

Os solos residuais são aqueles que se encontram no mesmo local de desagregação da rocha matriz, quando o processo de decomposição é mais rápido que os processos de transporte (PINTO,2006).

Conforme Martínez (2003), o acúmulo de solos residuais é formado quando a velocidade da decomposição da rocha mãe é superior ao transporte dos sedimentos provenientes da decomposição pelo vento, chuva, etc.

Para os solos residuais é importante determinar sua rocha mãe, pois ela condiciona a composição física do solo. Solos provenientes de basaltos são, em sua maioria, argilosos. Os de gnaiss são siltosos e os de granito possuem em sua constituição areia média, silte e argila (PINTO, 2006).

De acordo com Mendes (2008), a mineralogia e a microestrutura dos solos residuais tropicais estão associadas com o modo de ocorrência e formação do solo, favorecendo assim, o processo de decomposição através do intemperismo. Em regiões tropicais favorece a formação de argilominerais com presença de caulinita.

Pinto (2006) afirma que inicialmente os solos residuais se caracterizam pela sua heterogeneidade, que reproduz a heterogeneidade de sua rocha matriz. Essa característica pode dificultar a determinação de suas propriedades através de ensaios de laboratório, pois corpos de prova moldados a partir de uma única amostra podem apresentar diferentes características.

2.1.3 Solo Transportado

É classificado como transportado o solo residual que sofre a ação transportadora dos agentes geológicos: mar, rio, vento, gelo, gravidade. Este tipo de solo apresenta grande quantidade de matéria orgânica em sua composição e não possui ligação com a rocha original (VARGAS, 1977).

2.1.4 Solo Laterítico

Conforme Pinto (2006), originam-se em climas quentes e úmidos onde o intemperismo é intenso e os solos tornam-se espessos, desenvolvendo uma

vegetação diversificada, sendo que a umidade, a temperatura alta e a abundância de vegetação aceleram o intemperismo químico da camada superior do solo. Os minerais solúveis da rocha são lixiviados resultando no laterito, que é um solo vermelho espesso, rico em óxidos de ferro e alumínio e hidróxidos. A presença desses minerais confere ao solo tonalidade predominantemente vermelha, quando há presença de hematita, e amarela, quando há presença de goethita. Em sua forma natural, os solos lateríticos possuem elevada porosidade, fator que confere ao solo baixa resistência e baixa capacidade de carga, porém, ao sofrer compactação, há um ganho de resistência e de capacidade de carga (PINTO, 2006).

2.1.5 Solo Orgânico

Segundo Tonin (2013), os solos que se caracterizam por apresentarem como constituinte principal, a matéria orgânica, proveniente de restos vegetais ou animais (solos diatomáceos) são denominados solos orgânicos. Camadas sedimentares de argila, areia fina e silte com húmus e turfas (grandes teores de carbono) são os mais comuns em solos orgânicos

2.1.6 Solo Colapsível

Segundo Gutierrez (2005), colapso é o fenômeno decorrente da perda de resistência ao cisalhamento de um solo poroso e não saturado, quando inundado sob uma determinada tensão aplicada, ocasionando uma espécie de desmoronamento de sua estrutura.

Nas obras civis, o colapso se manifesta com o surgimento de trincas e rachaduras nas construções, rupturas de aterros, deslizamentos de taludes e de túneis, danos estruturais em pavimentos, deformações excessivas de maciços compactados durante enchimentos de reservatórios, colapso nas fundações e outros (GUTIERREZ, 2005).

A autora descreve que os depósitos de solos residuais colapsíveis são constituídos por grãos ou partículas de diferentes tamanhos, resultantes do intemperismo, produzidos pela desintegração mecânica e decomposição química das rochas locais. As estruturas porosas das camadas superficiais se originam da intensa lixiviação dos elementos solúveis e da concentração de óxidos de ferro e de alumínio,

que formam as frações finas do solo, pela ação das águas de percolação. Disso resultam altos índices de vazios, baixas massas específicas e estrutura instável do solo.

2.2 A ÁGUA NO SOLO. PERMEABILIDADE E POROSIDADE

2.2.1 Permeabilidade do Solo

De acordo com Pinto (2000, p.), a maior parte ou a totalidade dos vazios do solo frequentemente é ocupada pela água que se desloca no seu interior mediante diferenças de potenciais.

A propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento da água através dele, é expressa numericamente pelo coeficiente “K” de permeabilidade (CAPUTO, 1996).

2.2.1.1 Fatores que influenciam a Permeabilidade do Solo

Diversos fatores influenciam a permeabilidade no solo, podendo-se destacar, conforme Caputo (1996):

- 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. A 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 NBR 14545 (2000) deve-se corrigir a temperatura para o valor de 20° C, por intermédio da seguinte Equação:

$$K_{20} = R_T \times K \quad (2.1)$$

Onde:

K₂₀: coeficiente de permeabilidade referido à temperatura de 20°;

RT: relação entre a viscosidade da água na temperatura de ensaio e a viscosidade da água a 20° C, demonstrado na Tabela 2.2.

Tabela 2: Relação entre a viscosidade da água na temperatura de ensaio e a viscosidade da água a 20°C (RT)

Temp. °C	RT									
	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	1,349	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	1,181	1,177	1,174	1,171	1,167
14	1,165	1,162	1,159	1,156	1,153	1,151	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	1,071	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	1,023	1,021	1,018	1,051	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	0,228	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	0,830
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	0,780	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 (2000).

- 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, como mostra a Tabela 2.3.

2.2.1.2 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) os quais 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 2.3.

Tabela 3: Valores de 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 PAZZETO (2009, conhecimento do valor da permeabilidade é muito importante em algumas obras de engenharia, essencialmente, na estimativa da vazão que percolar á pelo meio do maciço e da fundação em barragens de terra, em obras de drenagem, rebaixamento do nível d'água, adensamento, etc.

2.2.2 Determinação do coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica (K)

De acordo com Pinto (2009), a 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).

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

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 distancia Δs . Assim a Lei de Darcy assume o formato apresentado pela Equação 2.3

$$Q = K . i . A \quad (2.3)$$

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. Resulta 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 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.

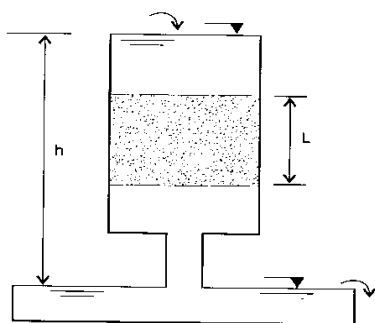
Um escoamento se define laminar quando as trajetórias das partículas d'água não se cortam; em caso contrário, denomina-se turbulento (CAPUTO, 2006).

Quanto aos procedimentos de Ensaio de Laboratório para determinar o coeficiente de permeabilidade dos solos, Vargas (1977), acrescenta que é realizada através do permeâmetro, com os seguintes procedimentos: permeâmetro de carga constante, permeâmetro de carga variável e ensaios de campo e métodos indiretos.

2.2.2.1 Permeâmetro de Carga Constante.

Este ensaio consta de dois reservatórios onde os níveis de água são mantidos constantes, como mostra a Figura 1.

Figura 1: Esquema de Permeâmetro de Carga Constante



Fonte: FERREIRA, 1989.

Mantida a carga h , durante certo tempo, a água percolada é colhida e o seu volume é medido. Conhecidas a vazão e as dimensões do corpo de prova (comprimento L e a área da seção transversal A), calcula-se o valor da

permeabilidade, k , através da Equação 2.5

$$k = \frac{qL}{Ah t} \quad (2.5)$$

Onde:

q - é a quantidade de água medida na proveta (cm^3);

L - é o comprimento da amostra medido no sentido do fluxo (cm);

A - área da seção transversal da amostra (cm^2);

h - diferença do nível entre o reservatório superior e o inferior (cm);

t - é o tempo medido entre o início e o fim do ensaio (s).

O permeâmetro de carga constante é empregado geralmente para solos granulares (arenosos) e o coeficiente k é determinado medindo-se a quantidade de água, mantida a nível constante, que atravessam em um determinado tempo t uma amostra de solo de seção A e altura L conhecidas. A quantidade Q de água que atravessa a amostra é recolhida em um recipiente graduado, onde é medida (CAPUTO, 1996).

VARGAS (1977) indica que tanto o ensaio permeâmetro de carga constante quanto o de carga variável, podem ser realizadas com amostras amolgadas ou compactadas moldadas no laboratório nas condições em que se deseja, ou com amostras indeformadas-cortadas cuidadosamente do terreno natural, de forma a conservar não só seu índice de vazios e umidade natural, como também sua estrutura. Para o caso das areias cuja estrutura granular é simples e depende somente da densidade dos grãos, o caminho mais adequado para se determinar a permeabilidade é de se ensaiar amostras moldadas em laboratório, sob diversos índices de vazios..

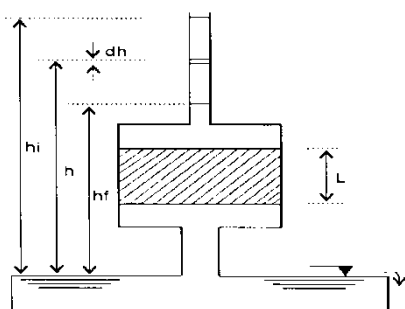
2.2.2.2 Permeâmetro de Carga Variável.

A Norma Brasileira 14545/2000 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 do permeâmetro, que é constituído por um cilindro metálico com 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, Figura 2.

O permeâmetro de carga variável é empregado quando o coeficiente de permeabilidade é muito baixo, pois nesta condição a determinação pelo permeâmetro de carga constante é pouco precisa (PINTO, 2006).

Figura 2: Esquema de permeâmetro de carga variável.



Fonte: FERREIRA, 1989, p.27

No ensaio de permeabilidade de carga variável, medem-se os valores h obtidos para diversos valores de tempo decorrido desde o início do ensaio. São anotados os valores da temperatura quando da efetuação de cada medida. O coeficiente de permeabilidade dos solos é então calculado fazendo-se uso da lei da Darcy: $q = k \frac{h}{L} A$ e levando-se em conta que a vazão de água passando pelo solo é

igual a vazão da água que passa pela bureta, que pode ser expressa como: $q = \frac{-a dh}{dt}$

(conservação da energia).

Onde:

a - área interna do tubo de carga (cm^2)

A - seção transversal da amostra (cm^2)

L - altura do corpo de prova (cm)

h_0 - distância inicial do nível d'água para o reservatório inferior (cm)

h_1 - distância para o tempo 1, do nível d'água para o reservatório inferior (cm)

Δt - intervalo de tempo para o nível d'água passar de h_0 para h_1 (cm).

Segundo Caputo (1996), os permeâmetros de carga variável são usados principalmente para a determinação do coeficiente de permeabilidade de amostras de solo argiloso, as quais, sendo praticamente impermeáveis, são atravessadas por quantidades de água muito pequenas, durante o ensaio.

2.2.3 Porosidade do Solo

De acordo com TEIXEIRA *et al* (2009, p. 121), “porosidade é uma propriedade física definida pela relação entre o volume de poros e o volume total de um certo material”.

São dois os tipos fundamentais de porosidade nos materiais terrestres: a porosidade primária e a secundária.

A porosidade primária é gerada juntamente com o sedimento ou rocha, sendo caracterizada nas rochas sedimentares pelos espaços entre clastos ou grãos (porosidade Inter granular) ou planos de estratificação. Já a porosidade secundária se desenvolve após a formação das rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares, por fraturamento ou falhamento durante sua deformação (porosidade de fraturas) (TEIXEIRA *et al*, 2009).

Percebe-se que a porosidade contribui para o fluxo e ou a retenção de água no solo. Para Mesquita; Moraes (2004), O fluxo e a retenção de água no solo dependem da profundidade, textura, estrutura, porosidade e pedoforma, as quais podem integrar-se das mais variadas maneiras”.

Teixeira *et al* (2009) concluem que a porosidade é constituída, pelo espaço poroso, após o arranjo dos componentes da parte sólida do solo e que, em condições naturais, é ocupada por água e ar. Os autores pontuam que “o principal fator que determina a disponibilidade de água subterrânea não é a quantidade de água que os materiais armazenam, mas a sua capacidade em permitir o fluxo de água através dos poros” (TEIXEIRA *et al*, 2009, p. 122); remetem também que a existência da permeabilidade depende do tamanho dos poros e da conexão entre eles.

Segundo Castro & Vieira (1996) *apud* Martins *et al*.(2002) um dos atributos físicos mais importantes para indicar a qualidade do solo é a permeabilidade, sendo dependente da quantidade, continuidade e tamanho dos poros. A passagem de água com maior ou menor facilidade através dos poros é numericamente expressa pelo Coeficiente de Permeabilidade (K)

O Quadro 2 demonstra a relação da porosidade com a permeabilidade em diferentes materiais terrestres.

Quadro 02: Relação entre o volume de poros e tamanho de partículas em sedimentos .

Material	Tamanho das partículas, mm	Porosidade %	Permeabilidade
Cascalho	7 a 20	35,2	Muito Alta
Areia grossa	1 a 2	37,4	Alta
Areia fina	0,3	42	Alta a Média
Siltes e argila	0,04 a 0,006	50 a 80	Baixa a muito baixa

Fonte: TEIXEIRA *et al.* (2009)

Consoante os autores, observa-se fato importante da diminuição da permeabilidade com o aumento da porosidade e diminuição do tamanho da partícula. Ainda, de acordo com os mesmos autores, um sedimento argiloso possui alta porosidade, no entanto, é praticamente impermeável, pois os poros são muito pequenos e a água fica presa por adsorção. Por outro lado, derrames basálticos, onde a rocha em si não tem porosidade alguma podem apresentar alta permeabilidade devido a esta porosidade primária.

2.3 ADENSAMENTO

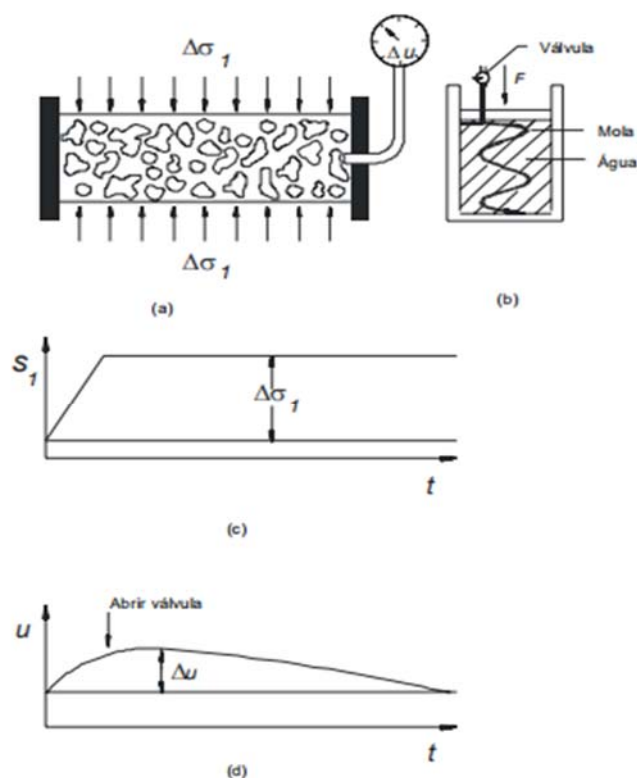
Segundo Ortigão (2007), um depósito de solo saturado e de baixa permeabilidade quando submetido a uma sobrecarga, apresenta recalques que tendem a aumentar lentamente com o tempo. Aterros em solos aluvionares de baixada ou em regiões de formação marinha, como os mangues, e até mesmo edificações assentadas sobre camadas fracas, como é o caso de muitos prédios altos construídos sobre argila na cidade de Santos, SP, são exemplos típicos da ocorrência desse fenômeno. Denominado adensamento ou consolidação, o fenômeno foi estudado por Terzaghi a partir de 1914, quando ainda era professor da Universidade de Istambul. Terzaghi desenvolveu o ensaio oedométrico, e posteriormente a denominada teoria do adensamento de Terzaghi.

2.3.1 Analogia do sistema água-mola de Terzaghi

A Figura 3 apresenta uma amostra de solo totalmente saturado e de baixa

permeabilidade, que será submetida a um estágio de pressão $\Delta\sigma_1$ no oedômetro da mesma figura. A amostra é composta de partículas de solo envolvidas por água, que preenche seus vazios. Um dispositivo qualquer, como um manômetro, permite a medição do acréscimo de pressão na água.

Figura 3: (a) Condições impostas à amostra em um ensaio de adensamento; (b) analogia do sistema água-mola de Terzaghi; (c) aplicação do carregamento versus tempo; (d) variação da poropressão com o tempo.



Fonte: Ortigão, 2007.

A equação diferencial do adensamento unidimensional, é considerada o marco fundamental da Mecânica dos Solos. É importante entender seu desenvolvimento teórico, analisando as hipóteses sobre as quais a teoria se baseia e suas limitações. Para representar matematicamente a analogia do sistema água-mola de Terzaghi são necessárias três equações, uma para representar o fluxo d'água, outra para a compressibilidade da mola, ou seja, do esqueleto sólido, e a terceira para garantir o equilíbrio. No primeiro caso é empregada a equação de continuidade de fluxo que, para o caso unidimensional, pode ser assim simplificada:

$$k = \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} \left(S \frac{\partial e}{\partial t} + e \frac{\partial S}{\partial t} \right)$$

onde:

k = permeabilidade na direção vertical

z = coordenada na direção vertical

h = carga hidráulica total

e = índice de vazios

S = grau de saturação

t = tempo

Quando empregada na teoria de Terzaghi, essa equação considera várias hipóteses, uma das quais é a validade da lei de Darcy. A proporcionalidade entre velocidade de fluxo e gradiente hidráulico tem sido comprovada mesmo em gradientes muito baixos, como os que podem ocorrer devido ao fluxo por consolidação. Com isso, a lei de Darcy pode ser estendida ao processo de consolidação, sem restrições.

A teoria de Terzaghi restringe ainda mais a equação voltada ao caso de solo saturado. Considerando $S = 1$ e $\partial S / \partial t = 0$, essa equação simplifica para:

$$k \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t}$$

O valor da carga total h é a soma da carga altimétrica h_a e piezométrica h_p , e esta última é igual à poropressão u dividida pelo peso específico da água γ_w , daí, vem

$$h = h_a + h_p = h_a + \frac{u}{\gamma_w}$$

O valor de u pode ser substituído por $u_0 + \Delta u$, isto é, poropressão estática ou correspondente à condição de equilíbrio, mais o acréscimo de poropressão Δu . Obtém-se, então:

$$h = h_a + (u_o + \Delta u) / \gamma_w$$

Aplicando o operador diferencial $\partial^2/\partial z^2$ na equação, verifica-se que $\partial^2 h_a / \partial z^2 = 0$ e $\partial^2 u_o / \partial z^2 = 0$. Assim:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \Delta u}{\partial z^2}$$

Consequentemente, a equação pode ser assim reescrita (eliminando o Δ , pois escrever $\partial \Delta u$ é uma heresia matemática, já que não se pode diferenciar um acréscimo; por esta razão, adota-se ∂u , onde u é o acréscimo de poropressão):

$$k \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t}$$

Para o comportamento do esqueleto sólido, Terzaghi adotou uma relação tensão-deformação linear:

$$\frac{\partial e}{\partial \sigma'_v} = -a_v$$

onde $\partial \sigma'_v$ é a tensão efetiva vertical e a_v , um módulo de compressibilidade. Introduzindo a equação. Num rearranjo da equação, tem-se:

$$\frac{k(1+e)}{\gamma_w a_v} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = - \frac{\partial \sigma'_v}{\partial t}$$

O termo independente à esquerda dessa equação foi denominado por Terzaghi de coeficiente de adensamento c_v (ou coeficiente de consolidação, que deve ser expresso em m^2/ano para facilitar as aplicações práticas em engenharia geotécnica). Esse coeficiente é expresso por:

$$c_v = \frac{k(1+e)}{\gamma_w a_v}$$

Nessa equação, verifica-se que a relação $(1+e)/a_v$ é o inverso do módulo de variação de volume m_v , daí:

$$c_v = \frac{k}{\gamma_w m_v}$$

2.4 RESÍDUOS SÓLIDOS E LIXO DOMICILIAR. A PERCOLAÇÃO COM CHORUME.

Estudos na área de demografia apontam que a população do planeta apresenta um crescimento acentuado, implicando concomitantemente no aumento da produção e consumo de bens e na geração de maior quantidade de resíduos sólidos e líquidos. Segundo pesquisas do IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, a geração de lixo é um dos grandes problemas dos centros urbanos e causa graves impactos ao meio ambiente, repercutindo na saúde humana (IBGE, 2010).

De acordo com o WWI Worldwatch Institute (2017), a expansão da população mundial e a urbanização induzem que mais e mais pessoas desenvolvam atividades econômicas nas mais diversas modalidades e produzam conseqüentemente, cada vez mais lixo, constituído de material orgânico como resto de alimentos, de material vegetal, papel, vidro, metais e plásticos.

. As mais diversas atividades humanas como produção de mercadorias e serviços, geram resíduos sólidos, que são encaminhados aos aterros sanitários (WWI, 2017).

Os aterros sanitários fazem um contraponto à antiga forma de disposição dos resíduos sólidos, o lixão. Tendo como principais diferenças a impermeabilização do solo e a cobertura periódica das camadas de lixo com uma camada de terra. A lixiviação e a decomposição são processos naturais que conduzem a formação do

chorume (KEMERICH, 2014).

2.4.1 Resíduos Sólidos

Popularmente, o termo resíduos é atribuído a coisas sem valor gerados pela atividade humana. Em sua composição os resíduos contêm basicamente os mesmos materiais encontrados no produto original (IWAI, 2005).

A ABNT NBR 10.004:2004 BNT (2006) esclarece que a classificação de resíduos sólidos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido.

Neste sentido, define resíduos sólidos como sendo:

[...] resíduos nos estados sólido e semissólido que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (NBR 10.004:2004 BNT, 2006).

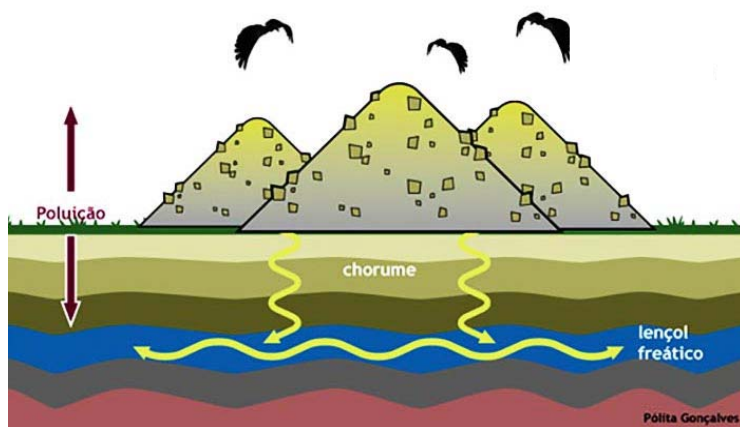
Segundo Nascimento (2007) a norma supracitada apresenta uma classificação dos resíduos sólidos mais voltada para as questões gerenciais desses materiais. Ela classifica os resíduos sólidos em classes:

- Resíduos classe I. Perigosos, de acordo com os critérios de periculosidade estabelecidos pela norma (inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade).
- Resíduos classe II A. Resíduos não perigosos e não inertes, podendo apresentar propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade, ou solubilidade em água. Nesta categoria incluem-se papéis, papelão, restos de vegetais e outros.
- Resíduos classe II B. Resíduos não perigosos e inertes, como rochas, tijolos, vidros, certos plásticos, vidros e borrachas que não se decompõem facilmente.

Percebe-se que a destinação do lixo produzido diariamente é um problema recorrente para quem administra as cidades, pois, segundo Silva (2006), quase todos os municípios brasileiros enfrentam continuamente o problema em torno da destinação do lixo, sendo que grande parte do mesmo tem como destino final os lixões

a céu aberto que causam graves prejuízos para o meio ambiente, à saúde e à qualidade de vida da população. Pode-se observar na Figura 3 como acontece a contaminação do lençol freático pelo chorume.

Figura 03: Lixão a céu aberto .



Fonte: IPEVERDE (2017).

Além dos lixões, onde os resíduos são depositados a céu aberto sem nenhum tipo de tratamento, o autor cita a destinação final do lixo através dos aterros sanitários. Para tanto, o autor ressalta que na construção de um aterro sanitário é imprescindível utilizar técnicas que possibilitam armazenar um maior volume de matéria na menor área possível e de compactação do lixo em camadas sobrepostas por terra, representando, portanto, menos riscos ao meio ambiente, de perigos à segurança e a saúde pública.

De acordo com Ipeverde (2017), os aterros sanitários são as instalações mais adequadas para a disposição dos resíduos sólidos urbanos. O terreno é impermeabilizado com argila e mantas de PVC e o lixo é aterrado todos os dias, sendo realizada a drenagem e tratamento do chorume para ser depois devolvido ao meio ambiente sem risco de contaminação. São instaladas também tubulações para a captação do biogás que é queimado e pode ser aproveitado para gerar energia. Poços de monitoramento são abertos próximo aos aterros para avaliar constantemente a qualidade da água. A Figura 4 apresenta a imagem de um aterro sanitário.

Um aterro sanitário bem projetado e controlado, discorre Silva (2000), além de resolver o problema de destinação do lixo e resíduos sólidos, possibilita o reaproveitamento do terreno para reservas biológicas.

Figura 4: Imagem de um aterro sanitário



Fonte: Ipeverde, (2017).

Conforme Nascimento (2000), um sério problema que ocorre nos aterros sanitários é a formação de chorume, que é o líquido produzido pela massa orgânica do lixo durante o processo de degradação biológica. Esse líquido em contato com a água da chuva e que percola a massa do aterro, gera o lixiviado, tóxico, com valores elevados de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e DQO (Demanda Química de Oxigênio), traços de metais dissolvidos e amônia.

2.4.2 Geração de chorume e características químicas

Para Ipeverde (2017), a vida útil de um aterro sanitário é de aproximadamente 20 anos, sendo que, mesmo depois de desativados, continuam produzindo gases e chorume, por isso a área ainda deve ser monitorada e posteriormente recuperada.

O chorume é formado pela solubilização de componentes do lixo na água, principalmente da chuva. Essa água fica em contato com o lixo durante certo período e, por ação natural da gravidade, percola através da porosidade existente até encontrar uma camada impermeável do solo, formada por rochas ou mesmo por superfícies previamente preparadas para receber o lixo, onde acumula e escoar (TARTARI, 2003).

Segundo Tchobanoglous *et al* (1993) *apud* Iwai (2005), a qualidade do chorume, assim como a composição do gás de um aterro sanitário varia em função das fases de degradação em que se encontra a massa de resíduos biodegradáveis.

Ele cita vários componentes que influenciam na qualidade do chorume, como a idade do aterro, o tipo e composição do lixo. Relata que existem certas tendências

para os níveis de concentração de contaminantes do chorume ao longo do tempo, no entanto, as concentrações principalmente de ferro (Fe), cloro (Cl), e nitrogênio amoniacal (N-NH₃) não se alteram com a mesma taxa para diferentes lugares, pois o tempo é apenas um dos fatores relevantes. Outro fator é a infiltração que se transforma no chorume pela lixiviação.

Outros fatores interferem na qualidade do chorume, além da vida útil do aterro, como eventos e atividades operacionais do aterro, tais como precipitação pluviométrica e localização frente de descarga. Depende também de fatores tais como eficiência do sistema de drenagem e da qualidade da impermeabilização da base (IWAI, 2005).

2.4.3 O Solo como Elemento Depurador

Segundo Teixeira (2009), a deposição de resíduos sólidos de origem doméstica ou industrial tem causado muitos incidentes de contaminação na água subterrânea mundo afora. Cita que a importância de estudar o solo destinado à construção de aterros de resíduos tendo em vista identificar o potencial de cada solo em atuar como um elemento filtrante, depurador e condutor do chorume.

Refere ainda alguns requisitos fundamentais que necessitam ser observados, como a localização em local que não interfira em aquíferos existentes e em corpos de água superficial, e a realização de estudos hidro geológicos prévios, assim como a utilização dos materiais e o atendimento aos itens necessários quando da construção,

De acordo com Iwai (2005, p. 23),

A capacidade de campo dos resíduos sólidos domésticos é representada pela umidade total que pode ser retida em uma amostra de resíduo, submetido à ação gravitacional. A capacidade de campo desses resíduos é de importância crítica na formação do chorume nos aterros sanitários. A quantidade de chorume pode ser relacionada diretamente com o excedente da capacidade de campo. A capacidade de campo varia com o grau compactação e o estado de decomposição do resíduo aterrado.

PAGANINI (1997), *apud* Iwai (2005) descreve o solo como um meio físico formado por substâncias minerais e orgânicas, cujas formas predominantemente granulares conferem-lhe propriedades características como a porosidade, a permeabilidade, a textura e outras. Essas propriedades compreendem processos físicos, químicos e biológicos de remoção de carga poluidora disposta principalmente pelos esgotos domésticos no solo.

IWAI (2005), cita que são quatro as propriedades do solo importantes para sua utilização como para disposição:

Capacidade de troca iônica. A capacidade que um solo possui de reter os íons metálicos trazidos pelos esgotos, e impedi-los de atingir as águas superficiais e ou subterrâneas, bem como os tecidos vegetais, depende em grande parte de sua capacidade de troca iônica.

Capacidade tampão. Provém de diversos fatores: solos carbonatados tamponados para um pH igual ou maior que 7 inibem a solubilidade dos metais pesados.

Filtrabilidade do solo. Refere-se a sua eficiência como um filtro (físico) de partículas em suspensão. Solos permeáveis de textura intermediária apresentam um conteúdo coloidal suficiente para aprisionar ou reter partículas, e constituem-se nos melhores filtros.

Microbiologia do solo. A disposição de esgotos sobre o solo ocasiona transformações microbiológicas que envolvem a utilização de microrganismos, a fim de transformar alguns compostos como o nitrogênio, o fósforo, o enxofre e o carbono. Essas quatro propriedades são os resultados de vários fatores, cuja interação, com reflexos sinérgicos ou inibitórios, fixará as propriedades do solo como um todo (IWAI, 2005).

III - CAPÍTULO 3

3.1 METODOLOGIA

3.1.1 Especificação da Pesquisa e localização do solo estudado

Desenvolveu-se a pesquisa através de uma abordagem de natureza qualitativa e quantitativa tendo como objeto a análise da permeabilidade do solo percolado com chorume através de 2 (duas) amostras de solo coletadas do Campo experimental do Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz – FAG, Figura 5. Uma amostra indeformada nas condições naturais de campo e outra moldada sob energia natural de Proctor. Os ensaios foram executados no laboratório de Mecânica dos solos do Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz – FAG.

Figura 5: Local dos ensaios.



Fonte: Google Maps, 2017.

Para a realização dos ensaios de percolação seguiu-se a NBR 14545/2000 (Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável).

As amostras estudadas foram coletadas na cota -1 do campo experimental, com objetivo de obter-se os coeficientes de permeabilidade do solo em seu estado natural e compactada percolando chorume através dos ensaios.

3.1.2 Caracterização do solo local

Segundo o Instituto Ipardes (2017), o Município de Cascavel, está localizado na região oeste do estado do Paraná, Figura 6, entre as coordenadas geográficas de longitude 53° 44' 52" e O 53° 3' 21' e de latitude S 25° 23' 40" e S 24° 43' 2".

O Município 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 (CASCABEL, 2017, b).

Figura 6: Localização do Município de Cascavel no Estado do Paraná



Fonte: IPARDES (2017).

Dados relacionados ao solo do Município de Cascavel indicam que o solo local é de origem laterítica e possui características colapsíveis,

Os principais dados políticos e geográficos do município segundo Cascavel, (2017), são:

- Instalação 14/12/1952,
- Área Territorial 2.100,831 km²,
- Altitude 781 metros,
- Distância à Capital 491,00 km,
- População 316.226 habitantes.

De acordo com a mesma fonte, os principais indicadores humanos são:

Densidade Demográfica 146,13 hab/km².

Grau de Urbanização 94,36 %,
Índice de Desenvolvimento Humano - IDH-M 0,782.

3.1.3 Extração das amostras deformáveis e indeformáveis

O passo inicial foi a coleta das amostras de solo para estudo. A primeira amostra deformável foi coletada da superfície da cava do Campo Experimental e armazenada quantidade suficiente para a moldagem suficiente de um corpo de prova. o ensaio de compactação em um saco plástico. A segunda amostra foi coletada com auxílio de uma camisa metálica de 15 cm de diâmetro que foi cravada na cota -1 do mesmo local onde foi coletada a amostra deformável conforme Figura 7.

Figura 7: Camisa metálica sendo cravada no solo.



Fonte: Autor (2017)

3.1.4 Chorume

O aterro sanitário localiza-se na localidade de Espigão Azul, zona rural de Cascavel-PR, a cerca de 25 Km do Centro Gerador, com uma coleta diária de mais de 240 toneladas de resíduos, Figura 3.2.

Coletou-se 15 litros do líquido percolado do aterro no primeiro tanque de tratamento do chorume, ou seja, onde o chorume encontra-se no seu estado bruto, com auxílio de um galão de 20 Litros para a coleta.

Figura 8: Aterro Sanitário de Cascavel -.PR.



Fonte: Google Maps, 2017.

Figura 9: Lagoa de tratamento de chorume bruto do Aterro Sanitário de Cascavel-PR



Fonte: O Autor, 2017.

3.1.5 Utilização do solo como elemento depurador

Segundo o responsável técnico pelo aterro Eng. Químico Elmo Rowe Junior, o aterro apresenta as seguintes características:

- Impermeabilização de base (geomembrana PEAD);
- Compactação dos resíduos;
- Cobertura diária dos resíduos;
- Drenagem de gases e percolado;
- Sistema de reaproveitamento de gases;
- Sistema de tratamento de percolado (chorume);

Complementa o engenheiro responsável que o aterro conta também com um sistema de geradores de energia.

3.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

3.2.1 Ensaio de compactação para a amostra deformável

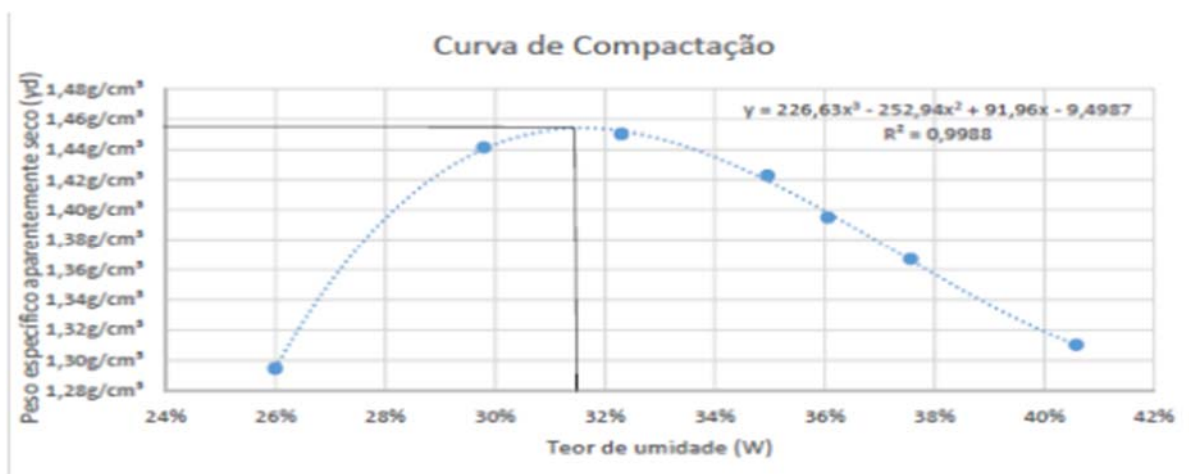
Para a compactação da amostra deformável foi realizado o Ensaio de Compactação conforme a NBR 7182/1982, para reduzir o índice de vazios em relação à amostra no estado natural e consequentemente reduzir a percolação de chorume.

3.2.2 Umidade ótima do solo

O teor de umidade no qual o solo atinge sua maior massa específica aparente seca é denominado de umidade ótima (CAPUTO, 1996).

O ensaio para determinação da umidade ótima do solo estudado foi realizado por Sidney (2016), conforme demonstra a Figura 10. O autor executou o ensaio seguindo os passos do ME-64 – Determinação do Teor de Umidade de Solos (2003). O teor de umidade ótima do solo estudado foi definido (31,5%).

Figura 10: Umidade ótima do solo estudado.



Fonte: Sidney, 2016.

Com a umidade definida (31,5%) deu-se início a moldagem do Corpo de Prova para o ensaio de compactação.

3.2.3 Equipamentos Utilizados

- Balança com capacidade para pesar nominalmente 10 Kg e 200 g, com resolução de 1 g e 0,01g respectivamente, e sensibilidade compatível;
- Peneira de 19 e 4,8 mm, de acordo com a NBR 5734;
- Estufa apropriada para manter a temperatura entre 105° e 110°;
- Bandeja metálica de 75 cm x 50 cm x 5 cm;
- Régua de aço com comprimento de 30 cm;
- Espátulas de lâmina flexível;
- Cilindro metálico (Cilindro de Proctor) grande;
- Soquete grande. Consiste de um soquete metálico com massa de (4.536 +- 10)g e dotado de dispositivo de controle de altura de queda (guia), que é de (457 +- 2)mm;
- Provetas de vidro com capacidade de 1.000 cm³, 200 cm³ e 100 cm³ e com graduações de 10 cm³, 2 cm³ e 1 cm³, respectivamente;
- Desempenadeira de madeira com 13 cm x 25 cm;
- Extrator de corpo-de-prova;
- Conchas metálicas com capacidade 1.000 cm³ e 500 cm³;
- Papel filtro com diâmetro igual ao do molde empregado.

3.2.4 Energia de compactação

As energias de compactação especificadas na NBR 7182/1986 são: Normal, intermediária e modificada, conforme a Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Energias de compactação

Cilindro	Característica inerente a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Número de Camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27
Grande	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Número de Camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador (mm)	63,5	63,5	63,5

Fonte: NBR 7182 (1986)

Utilizou-se para o estudo o cilindro grande e a energia de compactação normal, ou seja, 5 camadas com 12 golpes aplicados.

3.2.5 Execução do Ensaio

Para início do ensaio de compactação, foi colocado em uma estufa 2 bandejas de solo deformado com aproximadamente 5 kg de solo cada, por 24 horas para total secagem do material, chegando assim a uma umidade de 0% do solo. Após esse período, foi retirado da estufa as bandejas de solo e rapidamente destorroado e peneirado na peneira 4,8 mm uma quantidade exata de 3 kg de solo como representado na Figura 11

Com a massa de solo seco definida calculou-se a quantidade exata de água a ser acrescentada no solo peneirado para obter a umidade ótima do solo de 26,5% (5% abaixo da umidade ótima), a água foi adicionada aos poucos e misturada com o solo até ficar uma mistura homogênea conforme a Figura 11.

Figura 11: Pesagem do solo para obter-se a umidade ótima.



Fonte: Google Maps, 2017.

Figura 12: Mistura de água no solo.



Fonte: O Autor, 2017.

Após a completa homogeneização do material deu-se início a execução do ensaio de Proctor de acordo com a NBR 7182/1986 (Solo-Ensaio de Compactação). Utilizou-se o cilindro grande para a execução do ensaio, colocando-se um disco espaçador na sua base e um papel filtro no disco, de modo a evitar aderência do solo compactado a superfície metálica do disco espaçador, Figura 13. Aplicou-se 12 golpes

do soquete grande em 5 camadas de solo no cilindro grande, ou seja, energia de compactação normal, conforme a norma utilizada.

Com o corpo de prova devidamente compactado e após a retirada do colarinho utilizou-se um macaco hidráulico para extrair a amostra compactada do cilindro, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 13: Aplicação de Golpes de Soquete.



Fonte: O Autor, 2017.

Figura 14: Amostra sendo extraída no macaco hidráulico.



Fonte: Autor 2017

Para a extração da amostra *in natura* foi utilizado um disco circular adaptado para empurrar a amostra extraído do cilindro.

3.2.6 Ensaio de permeabilidade de solos argilosos a carga variável

Segundo a NBR 14545/00 o ensaio de permeabilidade de solos argilosos à carga variável fundamenta-se nas leis de Darcy, pressupondo, portanto, a existência de proporcionalidade direta entre as velocidades de fluxo e os gradientes hidráulicos. Admite-se adicionalmente a continuidade do escoamento sem variações de volume do solo, durante o ensaio, e a saturação total do corpo-de-prova.

O ensaio escolhido foi o de permeabilidade de solos argilosos à carga variável conforme a norma NBR 14545/00.

Como foi o utilizado o cilindro grande para o ensaio de compactação e uma camisa metálica com a mesma dimensão de 15 cm de diâmetro o molde retirado de ambas teve de ser talhado com auxílio de uma espátula, faca e régua metálica até a

dimensão desejada de 10 cm de diâmetro e 10 cm de altura, indicado na NBR 14545/00 para o método B.

Figura 15: Amostra talhada na dimensão desejada.



Fonte: Autor 2017.

Aplicou-se uma fina camada de parafina nas laterais dos corpos de prova com auxílio de um pincel a fim de evitar a “fuga” de água pelas laterais do corpo e manter a sua integridade física, Figura 16. Depois de parafinado, levou-se o corpo de prova até um tanque com água que foi deixado submerso por 24 horas para a total saturação do corpo de prova, Figura 17.

Figura 16: Corpo de prova parafinado.



Fonte: Autor 2017.

Figura 17: Corpo da prova submerso em água.



Fonte: Autor 2017.

Utilizou-se o permeâmetro para o método B. colocou-se na sua tampa inferior uma malha de arame com 2mm de abertura e sobre ela uma camada de areia grossa até uma altura de 1 cm, após isso foi inserido o corpo de prova saturado dentro do permeâmetro, cuidando para inseri-lo bem centralizado, podendo assim iniciar a colocação da argila do tipo bentonita nas laterais do cilindro, Figura 18.

A argila do tipo bentonita, teve de ser colocada em camadas da ordem de 2cm de altura, compactando-a com as mãos, e tendo o cuidado em manter a aplicação ideal de força, evitando-se aplicar muita pressão na argila.

É importante manter a aplicação ideal de força, pois, com pouca aplicação de força, ela começa a entrar embaixo da amostra, levantando-a, não garantindo assim, que o corpo esteja totalmente confinado e com as laterais impermeabilizadas.

Outro cuidado adotado foi com a preparação da própria argila, deixando-a com pouca umidade, permitindo então a sua fixação nas laterais do permeâmetro. O excesso de umidade não permitiria a aderência necessária para impermeabilizar o mesmo, pois, a perfeita impermeabilização evita o aparecimento de caminhos preferenciais entre as paredes do cilindro e do corpo de prova.

Na superfície da amostra utilizou-se um anel de material polimérico circundante ao corpo de prova e logo acima do anel foi colocada uma manta geotêxtil para auxiliar a filtragem, completou-se o restante da altura do cilindro com areia grossa e fechou-se o permeâmetro, Figura 19.

Figura 18 – Corpo de prova isolado com a argila bentonita.



Fonte: Autor 2017.

Figura 19: Permeâmetro pronto para ser fechado.



Fonte: Autor 2017.

Com o permeâmetro fechado, conectou-se os tubos nos orifícios da tampa superior e inferior e nas provetas graduadas, iniciando a percolação com chorume no sentido ascendente até o surgimento de líquido no orifício da tampa superior, após isso se adicionou o chorume até o nível máximo da proveta e aguardou-se 12 horas para garantir a percolação total do chorume e estabilizar os níveis das provetas, Figura 20.

Figura 20: Permeâmetro conectado nas provetas com chorume.



Fonte: Autor 2017.

Após a estabilização dos níveis das provetas foi adicionado mais uma quantia de chorume na proveta conectada à tampa inferior do permeâmetro e deu-se início as contagens de tempo, anotando-se os tempos t_1 e t_2 (em segundos) e os valores das cargas h_1 e h_2 (em centímetros) apresentadas pela bureta graduada conectada à tampa superior do permeâmetro. Foi repetido três vezes a contagem de tempo, sem apresentar variações significativas, após isso pôde-se iniciar os cálculos do coeficiente de permeabilidade.

3.2.7 Cálculo do coeficiente de permeabilidade

Com os valores de tempo e carga hidráulica anotados, foi calculado o coeficiente de permeabilidade (k) do solo percolando chorume, de acordo com a equação.

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

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).

3.3 TRABALHOS REALIZADOS

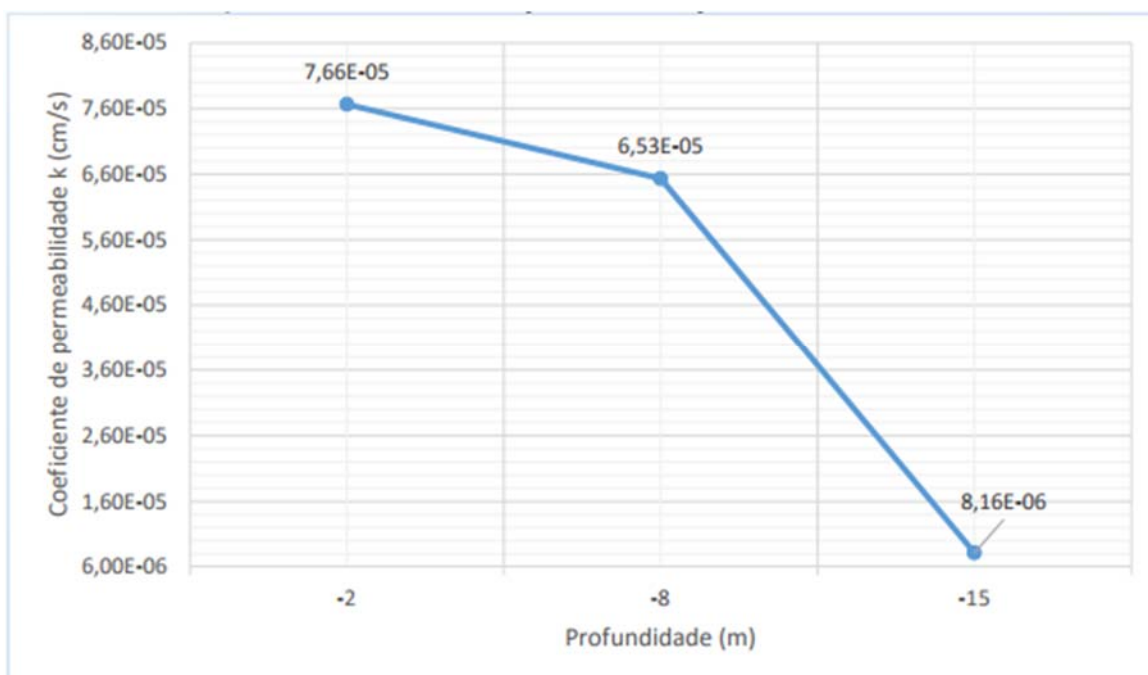
Falkowski (2016) conduziu no Campo Experimental da FAG um estudo sobre a permeabilidade do solo local em diferentes camadas, através de ensaios realizados com amostras retiradas das camadas -2, -8 e -15 conforme apresentado na tabela 2.5. O resultado apontou uma variação de cerca de 10 vezes no valor 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 .

Tabela 5 – 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
- 8	2	$6,45 \times 10^{-5}$ cm/s
-15	1	$8,79 \times 10^{-6}$ cm/s
- 15	2	$7,53 \times 10^{-6}$ cm/s

Fonte: Falkowski, 2016.

Gráfico 1: Variação média do coeficiente de permeabilidade para as cotas -2, -8 e -15 metros.



Fonte: Falkowski, 2016.

Em seu estudo, Falkoski (2016) concluiu que não houve variação tão significativa dos coeficientes de permeabilidade na cota -2 em relação a cota -8, diferença que não foi tão significativa devido as duas cotas serem da mesma camada, e a cota -15, 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.

CAPÍTULO 4

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1.1 Coeficiente de permeabilidade

Através dos ensaios realizados em laboratório, obteve-se os valores dos coeficientes de permeabilidade das amostras de solo retiradas *in natura* e compactadas, o processo foi repetido por 3 vezes em cada amostra sem apresentar variações significativas, o valor do coeficiente de permeabilidade (k) adotado foi a média dos 3 valores obtidos conforme a Tabela 6.

A amostra de solo compactada através do ensaio de Proctor com a energia de compactação normal retirada da cota -2 do campo experimental do Centro Universitário Assis Gurgacz percolando chorume apresentou uma variação de cerca de 14 vezes no valor do coeficiente de permeabilidade (k) em relação a amostra retirada *in natura*. O ensaio de compactação mostrou-se eficiente em reduzir o índice de vazios do solo e a velocidade de percolação do chorume no solo, levando em conta que os as duas amostras de solos foram retiradas no mesmo local.

Tabela 6: Resultados dos coeficientes de permeabilidade obtidos

	LEITURAS REALIZADAS DO COEFICIENTE K (cm/s)			
AMOSTRA	1	2	3	K ajustado(cm/s)
IN NATURA	$6,71 \times 10^{-5}$	$6,43 \times 10^{-5}$	$7,4 \times 10^{-5}$	$6,841 \times 10^{-5}$
COMPACTADA	$3,45 \times 10^{-6}$	$5,36 \times 10^{-6}$	$5,89 \times 10^{-6}$	$4,91 \times 10^{-6}$

Fonte: Autor 2017.

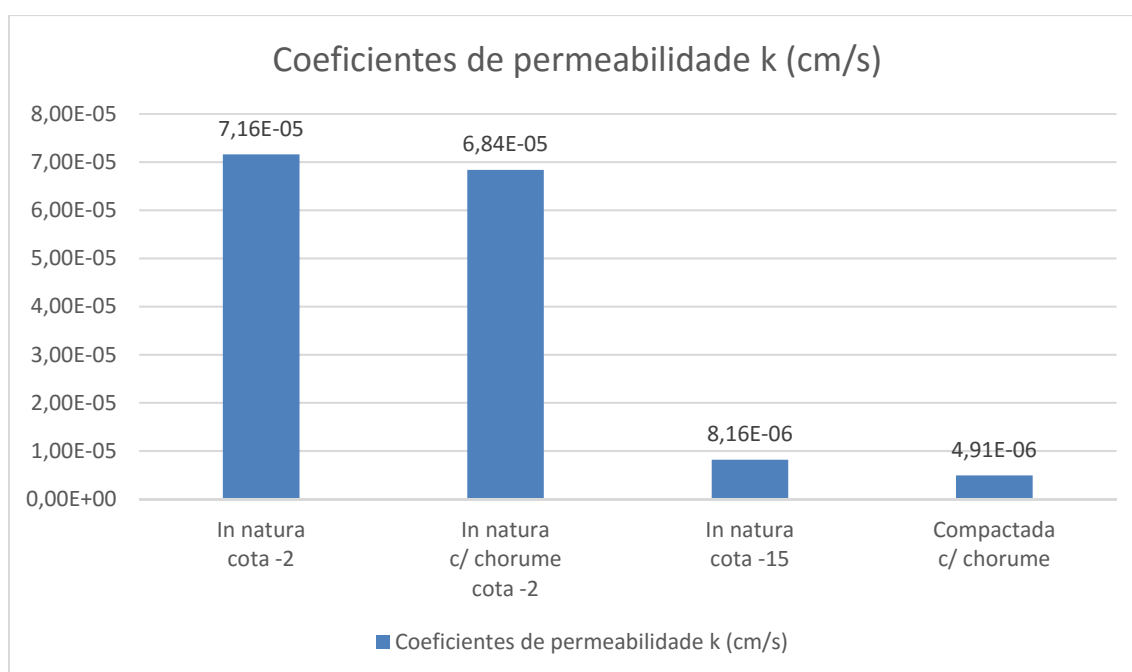
A Tabela 6 esboça os resultados dos cálculos realizados através das 3 leituras realizadas de cada amostra, Através deles foi possível determinar o valor médio do coeficiente de permeabilidade da amostra *in natura* de $6,8413 \times 10^{-5}$ cm/s e da amostra compactada de $4,91 \times 10^{-6}$ cm/s.

4.1.2 Comparação com ensaios já realizados no Campo Experimental

O resultado do coeficiente de percolação (k), determinado por Falkowski (2016), da amostra *in natura* do mesmo solo analisado e na mesma camada -2 foi de $7,664 \times 10^{-5}$. Pode-se notar uma pequena variação no resultado obtido. De acordo com Monteiro (2016) os valores de densidade e viscosidades da água e do chorume são bastante parecidos, evidenciando-se que a do chorume apresenta pequena variação acima, reduzindo um pouco sua capacidade de percolação no solo em relação a água.

Conforme representado no Gráfico 4.1 observa-se que a amostra de solo retirada *in natura* com percolação de chorume apresentou um coeficiente de percolação bem próximo ao obtido por Falkowski (2016), para solo da cota -15 metros, como se pode perceber pelos valores. A amostra compactada resultou em coeficiente de permeabilidade de $4,91 \times 10^{-6}$ cm/s, resultado que é classificado como grau de permeabilidade baixa.

Gráfico 4.1: Comparação de variações dos coeficientes de permeabilidade.



Fonte: Autor 2017.

Observa-se que a compactação do solo com a energia normal tem uma melhora no resultado em relação a redução da velocidade de percolação do chorume.

O solo compactado na sua umidade ótima, devido a redução no índice de vazios, dificulta a passagem da matéria orgânica e de poluentes pela camada do solo.

Para Franceschet (2006) é de extrema importância que no local a ser implantado um aterro sanitário exista um depósito natural de solo de baixa permeabilidade ($k < 10^{-6}$ cm/s) para isolar os resíduos sólidos e o líquido percolado, tanto na base do aterro como nas laterais, atuando como barreira e evitando-se a contaminação do subsolo.

De acordo com Ortigão (2007) um depósito de solo saturado e de baixa permeabilidade, quando submetido a uma sobrecarga, apresenta recalques que tendem a aumentar lentamente com o tempo. Com a compactação do solo na sua umidade ótima, obteve-se uma redução significativa no coeficiente de permeabilidade k do solo, conseqüentemente o aterro terá uma redução no coeficiente de compressibilidade, que de acordo a *teoria do adensamento de Terzaghi (1914)*, o coeficiente de compressibilidade (c_v) é diretamente proporcional ao coeficiente de permeabilidade.

Observou-se uma grande redução no coeficiente de permeabilidade do solo compactado em relação ao *in natura*, resultado que apresenta um significativo potencial de retenção de líquido percolado do aterro, e de acordo com Pazzeto (2009), coeficientes de permeabilidade entre 10^{-7} a 10^{-6} são considerados como aceitáveis para sistemas que desejam conter resíduos de efluentes de esgoto domésticos, através de lagoas de estabilização, tendo um grau de permeabilidade muito baixo.

CAPÍTULO 5

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa avaliou-se a influência da compactação através de ensaios laboratoriais a eficiência de uma compactação de solo do Campo Experimental do Centro Universitário Assis Gurgacz, na cidade de Cascavel-PR na retenção de percolação de líquidos poluentes proveniente do lixo (chorume), foram analisados duas amostras de solo para comparação, uma em seu estado natural, e outra compactada através do ensaio de Proctor conforme a NBR 7182/1986.

O resultado obtido foi o esperado, no qual a amostra compactada resultou em um coeficiente de permeabilidade de $4,91 \times 10^{-6}$ cm/s, valor esse 14 vezes menor que o resultado do coeficiente de permeabilidade da amostra *in natura*. Pode-se perceber uma grande redução na velocidade de percolação do líquido poluente no solo compactado em relação ao natural. Segundo Pazzeto (2009), coeficientes de permeabilidade entre 10^{-7} a 10^{-6} são considerados como aceitáveis para sistemas que desejam conter resíduos de efluentes de esgoto domésticos, através de lagoas de estabilização, tendo um grau de permeabilidade muito baixo.

Além disso, o resultado está dentro dos critérios retratados por Franceschet (2006), que afirma ser de extrema importância que no local a ser implantado um aterro sanitário exista um depósito natural de solo de baixa permeabilidade ($k < 10^{-6}$ cm/s) para isolar os resíduos sólidos e o líquido percolado, tanto na base do aterro como nas laterais, atuando como barreira e evitando-se a contaminação do subsolo.

Também pode-se afirmar que o resultado influencia diretamente na melhora do aterro em relação ao coeficiente de compressibilidade, que de acordo com Ortigão (2007) um depósito de solo saturado e de baixa permeabilidade, quando submetido a uma sobrecarga, apresenta recalques que tendem a aumentar lentamente com o tempo, a redução do coeficiente de permeabilidade k no solo compactado resulta também na redução do coeficiente de compressibilidade c_v , de acordo com a *teoria do adensamento de Terzaghi (1914)*.

Portanto a análise realizada resultou ser satisfatória para esse tipo de solo, com a energia de compactação normal obteve-se um grande redução no coeficiente de percolação do solo, podendo ser reduzida ainda mais se aplicado a energia de

compactação intermediária e modificada, esboçadas na NBR 7182/1986.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Classificação de Resíduos Sólidos - Norma ABNT NBR 10.004:2004**. Agosto, 2006.

_____. NBR 14545/00. Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos e carga variável. Rio de Janeiro, 2000.

_____. NBR 6502 – Rochas e Solos. 1995. Rio de Janeiro.

_____. NBR 7182/1986. Solo-Ensaio de Compactação.

_____. NBR 5734. Peneiras para ensaio com telas de tecido metálico.

CAPUTO, H. P. 6ª ed. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 1996. 234p.

CASCADEL. **Portal do município de Cascavel**: Indicadores de Cascavel. Disponível em: <<http://www.cascavel.pr.gov.br/indicadores.php>>
Acesso em: 02/Jun./2017.

DAS, B. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 6ª ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

EMBRAPA. CENTRO NACIONAL DE PESQUISAS DO SOLO. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SiBCS)**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.

FASOLO, P. J. *et al.* **Guia para Identificação dos Principais Solos do Estado Do Paraná**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Rio de Janeiro, RJ. 1986, 36p.

FALKOSKI. **Análise da permeabilidade de solo argiloso, do Campo Experimental de Engenharia da FAG, através de ensaios de carga variável**. Centro Universitário FAG, 2016.

ZEN. **Caracterização geotécnica do subsolo do campo Experimental do Centro Acadêmico da Fag em Cascavel/PR**. Centro Universitário FAG, 2016.

FERREIRA, M.M. et al. **Física do solo**. Lavras: UFLA/Departamento do Solo, 2000. 33 p.

GOMES, T.L. **Avaliação quali-quantitativa do percolado gerado no aterro controlado de Santa Maria – RS**. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria/RS, 2005.

GONÇALVES, H. H. *et al.* **MECÂNICA DOS SOLOS E FUNDAÇÕES**. 2014, Disponível:<<http://www.fau.usp.br/arquivos/disciplinas/au/pef0522/Apostila.pdf>>

Acesso: 10/jun./2017.

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

<https://www.google.com.br/search?q=formula+da+Lei+de+Darcy>. **Lei de Darcy**. Acesso em 10/jun./2017.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento básico**. 2008. Disponível em:
<<http://www.ibge.gov.br>> Acesso em: 02/mai./2017.

IPARDES. **Caderno Estatístico Município de Cascavel**. 2017. Disponível em
<<http://www.ipardes.gov.br/cadernos/MontaCadPdf1.php?Municipio=85800&btOk=ok>> Acesso: 02/mai./2017.

IPEVERDE. **Diferenças entre Lixão, Aterro Controlado e Aterro Sanitário**. Disponível em <<http://www.hypeverde.com.br/diferencas-entre-lixao-aterro-controlado-e-aterro-sanitario>>. Acesso: 02/jun./2017.

IWAI, C. K. **Tratamento de Chorume Através de Percolação em Solos Empregados como Material de Cobertura de Aterros para Resíduos Sólidos Urbanos**. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. Bauru, SP. Dissertação de Mestrado, 2005.

KEMERICH, P. D. C. *et al.* **Revista Monografias Ambientais – REMOA**. Caracterização do solo em área submetida a derramamento de lixiviado decorrente de aterro sanitário. UFSM, Santa Maria – RS, 2014, p. 2950 – 2959.

LIMA, V. C. *et al.* **Conhecendo os principais solos do Paraná: abordagem para professores do ensino fundamental e médio**. Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Estadual do Paraná, 2012.

MARTÍNEZ, G. S. E. S. **Estudo do comportamento mecânico de solos lateríticos da formação barreiras**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), 2003.

MARTINS, S.G. *et al.* Avaliação de atributos físicos de um latossolo vermelho distroférico sob diferentes povoamentos florestais. In: **Revista Cerne**. Lavras/MG. V.8, n.1, p.32-41, 2002.

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

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

MINEROPAR. **Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná**. Curitiba, 2006. 63 p. Disponível em:

<http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/2_Geral/Geomorfologia/Atlas_Geomorfologico_Parana_2006.pdf>. Acesso em: 02/Mai. 2017.

Ministério do Meio Ambiente. **Áreas Contaminadas**. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-perigosos/areas-contaminadas>>. Acesso 10 abr./2017.

NASCIMENTO, J. C. F. do. **Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo/ SP, 2007, 300p.

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.

OLIVEIRA, J. B. de. **Pedologia Aplicada**. 2. ed. Piracicaba: Fealq: 2005. 574 p.

PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 242p.

PREVEDELLO, C. L. Física do solo com problemas resolvidos. Curitiba: SAEAFS, 1996. 446 p.

RADOLL, J. **Aplicação de Fundações Rasas para o Solo de Cascavel-PR**. Trabalho de Conclusão de Curso. Cascavel, PR, 2014.

SAMPAIO, F. M. T. **Permeabilidade superficial de solos da sub-bacia do córrego centenário da cidade de Lavras-MG**. Lavras-MG. Dissertação de Mestrado, 2004.

SILVA, J. A. da. **Análise da qualidade da coleta e disposição final dos resíduos sólidos da cidade de Ivaiporã – Estado do Paraná**. 2000.

Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/79021>> Acesso em: 02/Mai./2017.

SIQUEIRA, J. de S. **MECÂNICA DOS SOLOS**. NT Editora. Brasília - DF, 2015, 188 p.

SOUZA, J. S. **Mecânica dos Solos**. Brasília: NT Editora, 2015, 188p. Disponível em <http://avant.grupont.com.br/dirVirtualLMS/portais/livros/pdfs_demo/Mecanica_dos_Solos_demo.pdf> Acesso: 16/abr./2017.

TARTARI, L. C. Avaliação do Processo de Tratamento do Chorume de Aterro Sanitário de Novo Hamburgo. In: **Revista Liberato** (Novo Hamburgo), Novo Hamburgo RS, v. 6, n. 6, p. 66-74, 2005.

TEIXEIRA, W. *et al.* **Decifrando a Terra** – 2ª edição. Companhia Editora Nacional. São Paulo. 2009.

TONIN, F. **Mecânica dos Solos.** Disponível em <https://engenhariacivilfsp.files.wordpress.com/2013/04/aula-1-e-2-revisao-solo-s.pdf>
Acesso: 02/Jul./2017.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos.** São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977. 509 p.

WWI Worldwatch Institute. **A ATIVIDADE HUMANA AGRAVA DESASTRES NATURAIS.** Disponível em
<www.wwiuma.org.brhttp://www.wwiuma.org.br/ativ_hum_desdesnatur.htm> Acesso: 31/mai./2017.