

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

***MEIRE FRANCESCHET***

*ESTUDO DA PERMEABILIDADE DE SOLOS DE ATERROS  
SANITÁRIOS DO ESTADO DE SANTA CATARINA: ESTUDO  
DE CASO APLICADO A TIMBÓ, CHAPECÓ E CURITIBANOS*

FLORIANÓPOLIS

2006

***MEIRE FRANCESCHET***

***ESTUDO DOS SOLOS UTILIZADOS EM CAMADAS DE BASE  
E COBERTURA EM ATERROS SANITÁRIOS DE RESÍDUOS  
SÓLIDOS URBANOS DE SANTA CATARINA***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Armando Borges de Castilhos Jr.

FLORIANÓPOLIS

2006

Franceschet, Meire

**Estudo dos solos utilizados em camadas de base e cobertura em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos de Santa Catarina.** Meire Franceschet – Florianópolis, 2006.

148f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico. Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental.

1. Aterros sanitários. 2. solos. 3. impermeabilização. 4. camada de base. 5. camada de cobertura.

# TERMO DE APROVAÇÃO

***Meire Franceschet***

***ESTUDO DOS SOLOS UTILIZADOS EM CAMADAS DE BASE  
E COBERTURA EM ATERROS SANITÁRIOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS  
URBANOS DE SANTA CATARINA***

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Armando Borges de Castilhos Júnior  
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSC.

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Pérciles Alves Medeiros  
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSC.

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Rejane Helena Ribeiro da Costa  
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSC.

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Marciano Maccarini  
Departamento de Engenharia Civil, UFSC.

Florianópolis, 20 de junho de 2006.

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer a Deus por mais esta conquista na minha vida.

Agradeço principalmente ao meu marido, André, pelo amor, amizade, paciência e por estar sempre do meu lado. Sua ajuda foi essencial para a conclusão desta pesquisa. E não foi fácil me agüentar no final desta dissertação.... Te amo muito!!!

Aos meus pais, José e Inês, por todos os ensinamentos e amor que passaram... A minha irmã Iane, pelo incentivo a realização desta pesquisa e pela amizade. A minha irmã Joseli pela amizade, companheirismo e conversas. Ao meu irmão Euler pelo apoio e amizade.

Ao meu sogro Nelson e minha sogra Célis, pela amizade e apoio.

Ao professor Armando Borges de Castilhos Jr. pela oportunidade desta pesquisa e pela orientação. Muito obrigada!

Ao Prof. Péricles Alves Medeiros, Prof. Marciano Maccarini e a Prof<sup>a</sup> Rejane Helena Ribeiro da Costa por aceitarem o convite para avaliação deste trabalho.

Aos meus amigos do mestrado e ao pessoal do Lareso. Agradeço a Cláudia pela grande ajuda prestada e amizade. Agradeço às amigas Karla, Elivete, Iona, Vivian, Marina, Madelon, Dani e aos amigos Joel, Lucas e Fábio. Obrigada pessoal.

Agradeço aos bolsistas pela ajuda prestada: Camila, Priscila e Pablo. Obrigada.

Agradeço ao pessoal do LIMA e do LMS pela ajuda e amizade, permitindo a realização dos ensaios e análises, especialmente ao professor Maccarini pela grande amizade desde o período de graduação.

À FUNCITEC e ao CNPq pelo apoio financeiro.

## RESUMO

A disposição final dos resíduos sólidos urbanos é um grande problema encontrado atualmente, devido à importância de se preservar o meio ambiente. Uma das maneiras mais comuns de disposição de resíduos sólidos é em aterros sanitários. Porém, vários devem ser os cuidados tomados na execução de um aterro sanitário para que este atenda às normas ambientais. Um destes cuidados é a impermeabilização das camadas de base e de cobertura do aterro, evitando que o líquido percolado, gerado pela decomposição dos resíduos sólidos e pela penetração de chuva na célula do aterro atinja o nível do lençol freático. Nesta pesquisa foram estudados os solos utilizados em camadas de base e cobertura de três aterros sanitários do Estado de Santa Catarina. Na primeira etapa da pesquisa foi realizada a coleta e caracterização dos solos, através de ensaios de Mecânica dos Solos. Posteriormente, montou-se o piloto experimental de fluxo, que consiste em permeâmetros que simulam a percolação do líquido percolado no solo. As amostras de solo foram compactadas em diferentes teores de umidade e grau de compactação para o estudo da percolação. O monitoramento dos permeâmetros foi realizado por um período de 180 dias, ou seja, seis meses. A permeabilidade dos solos foi medida semanalmente, assim como foram realizadas análises físico-químicas com o líquido percolado para estudo da contaminação. As análises químicas das amostras de solo foram realizadas antes e após a percolação com o líquido percolado. Os resultados indicaram que os solos utilizados para a camada de base dos aterros sanitários estudados são adequados e possuem permeabilidade muito baixa (menor que  $10^{-7}$  cm/s). Os solos dos aterros sanitários de Timbó e Chapecó utilizados para a camada de cobertura não atenderam ao valor da permeabilidade exigida por norma, o que poderá permitir a infiltração de água da chuva, aumentando a produção do líquido percolado. Observa-se que as amostras compactadas no ramo úmido da curva de compactação apresentaram menor coeficiente de permeabilidade e, com isso, reduzem a contaminação do lençol freático através da retenção de matéria orgânica e metais. Por isso, recomenda-se que as amostras de solo em campo sejam compactadas no ramo úmido da curva de compactação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aterros sanitários, solos, impermeabilização, camada de base, camada de cobertura.

## ABSTRACT

The final disposal of municipal solid waste is considered to be a big problem nowadays, due to the importance of environmental protection. One of the most common ways to dispose solid waste is by means of landfills. However, there are many aspects to be observed on the operation of a landfill, in order to achieve the compliance with legislation. One of these aspects is the base layer sealing and final capping of the landfill, avoiding the leachate, generated by the decomposition of solid waste and by the percolation of rain in the landfill cell, to reach the water table. This research aims studied the soils used in base layers and cap layers of three landfills in the State of Santa Catarina. The first research step consisted of the collection and characterization of soil samples, by means of solid mechanics experiments. Further, an experimental flux pilot, which simulates the leachate percolation through the soil, was assembled. The soil samples were then compacted in different water content and compaction degrees for the percolation study. The permeameters monitoring was then done along 180 days, it means, six months. The soil permeability was weekly measured and physico-chemical analyses were done with the leachate for the contamination study. The chemical analyses of soil samples were done before and after the leachate percolation. The results indicated that the soils used for the landfills base layer are adequate and have a very low permeability (lower than  $10^{-7}$  cm/s). The soils used for the cap layers of the Timbó and Chapecó landfills do not comply with the specific legislation, with respect to permeability, allowing rainwater infiltration and increasing the production of leachate. It can be observed that the samples compacted on the wet side of the compaction curve present a smaller permeability coefficient and, therefore, lead to a reduced contamination of the water table, through the organic matter and heavy metals retention. Therefore, it is recommended that the soil samples in the field should be compacted on the wet side of the compaction curve.

**KEY-WORDS:** Landfills, soils, sealing, base layer, cap layer.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 – Percentual do volume de lixo coletado, por tipo de destino final, segundo os estratos populacionais dos municípios – 2000. ....	20
Figura 3.2 – Corte de uma seção de um aterro sanitário .....	22
Figura 3.3 – Sistemas de cobertura final e diária .....	25
Figura 3.4 – Efeitos da compactação na estrutura do solo .....	33
Figura 3.5 – Efeitos da compactação na estrutura do solo .....	34
Figura 3.6 – Coeficiente de permeabilidade X tensão efetiva para diferentes temperaturas. ....	39
Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia .....	44
Figura 4.2 – Localização dos aterros sanitários .....	45
Figura 4.3 – Jazida de solo .....	46
Figura 4.4 – Solo utilizado para base .....	46
Figura 4.5 – Solo para cobertura.....	46
Figura 4.6 – Coleta do solo .....	47
Figura 4.7 – Ponto de coleta .....	49
Figura 4.8 - Coleta do líquido na saída .....	49
Figura 4.9 – Esquema do permeâmetro .....	51
(Unidades em cm).....	51
Figura 4.10 – Aplicação do golpe .....	52
Figura 4.11 – Primeira camada .....	52
Figura 4.12 – Solo compactado.....	52
Figura 4.13 – Esquema da saturação .....	53
Figura 4.14 – Esquema do ensaio.....	53
Figura 4.15 - Início da saturação.....	54
Figura 4.16 - Saturação.....	54
Figura 4.17 – Piloto experimental de fluxo .....	54
Figura 4.18 - Desmoldagem .....	56
Figura 4.19 – Película .....	57
Figura 4.20 – Abertura do CP.....	57
Figura 4.21 – Destorroamento.....	57
Figura 5.1 – Curva granulométrica da AM1.....	58
Figura 5.2 – Curva de compactação da AM1 .....	59



Figura 5.4 – Coeficiente de permeabilidade em função do tempo ( $h_{ot}$ água) .....	61
Figura 5.5 – Coeficiente de permeabilidade em função do tempo ( $h < h_{ot}$ ) .....	62
Figura 5.6 – Coeficiente de permeabilidade em função do tempo ( $h_{ot}$ ) .....	63
Figura 5.7 – Coeficiente de permeabilidade em função do tempo ( $h > h_{ot}$ ) .....	64
Figura 5.8 – Permeabilidade nas diferentes umidades de compactação ao longo do monitoramento .....	65
Figura 5.9 - Curva da difratometria de raios X antes da percolação .....	68
Figura 5.10 - Curva da difratometria de raios X após a percolação .....	68
Figura 5.11 – Líquidos percolados pela AM1 .....	69
Figura 5.12 – DQO x tempo para ramo seco .....	71
Figura 5.13 – DQO x tempo para $h_{ot}$ .....	71
Figura 5.14 – DQO x tempo para ramo úmido .....	72
Figura 5.15 – COT x tempo para ramo seco .....	73
Figura 5.16 – COT x tempo para $h_{ot}$ .....	74
Figura 5.17 – COT x tempo para ramo úmido .....	74
Figura 5.18 – pH x tempo para ramo seco .....	75
Figura 5.25 – Concentração de ferro nos permeômetros .....	79
Figura 5.26 – Concentração de zinco nos permeômetros .....	80
Figura 5.27 – Concentração do manganês nos permeômetros .....	81
Figura 5.28 – Concentração do cálcio nos permeômetros .....	82
Figura 6.1 – Curva granulométrica da AM2 .....	83
Figura 6.2 – Curva de compactação .....	84
Figura 6.3 – Curva de compactação obtida .....	85
Figura 6.4 – Coeficiente de permeabilidade em função do tempo (S6) .....	86
Figura 6.5 – Coeficiente de permeabilidade em função do tempo (S2) .....	86
Figura 6.6 – Valores do coeficiente de permeabilidade em função do tempo (S9) ...	87
Figura 6.7 – Variação da permeabilidade média para as diferentes amostras compactadas .....	88
Figura 6.8 - Curva da difratometria de raios X antes da percolação .....	90
Figura 6.9 - Curva da difratometria de raios X após a percolação .....	91
Figura 6.10 - Amostras que percolaram o solo de Chapecó .....	91
Figura 6.11 – Gráfico da DQO em função do tempo para ramo seco .....	92
Figura 6.12 – DQO em função do tempo para $h_{ot}$ .....	93
Figura 6.13 – DQO em função do tempo para ramo úmido .....	93

Figura 6.14 – COT em função do tempo para ramo seco .....	94
Figura 6.15 – COT em função do tempo para $h_{ot}$ .....	95
Figura 6.16 – COT em função do tempo para ramo úmido .....	95
Figura 6.17 – pH em função do tempo para ramo seco .....	96
Figura 6.18 – pH em função do tempo para $h_{ot}$ .....	96
Figura 6.19 – pH em função do tempo para ramo úmido .....	97
Figura 6.20 – Sólidos em função do tempo para ramo seco .....	97
Figura 6.21 – Sólidos em função do tempo para $h_{ot}$ .....	98
Figura 6.22 – Sólidos em função do tempo para ramo úmido .....	98
Figura 6.23 – Concentração de ferro nos permeâmetros.....	99
Figura 6.25 – Concentração de manganês nos permeâmetros.....	100
Figura 6.26 – Concentração de cálcio nos permeâmetros .....	101
Figura 7.1 – Curva granulométrica da AM1.....	102
Figura 7.2 – Curva de compactação .....	103
Figura 7.3 – Coeficiente de permeabilidade em função do tempo (S10).....	104
Figura 7.4 – Curva da Difração ao Raio X para a AM3 .....	105
Figura 8.1 – Curva granulométrica da AM4.....	106
Figura 8.2 – Curva de compactação .....	107
Figura 8.3 – Curva de compactação .....	108
Figura 8.4 – Coeficiente de permeabilidade em função do tempo (S11).....	109
Figura 8.5 – Coeficiente de permeabilidade em função do tempo (S5).....	110
Figura 8.6 – Coeficiente de permeabilidade em função do tempo (S5).....	110
Figura 8.7 – Coeficiente de permeabilidade em função do tempo (S3).....	111
Figura 8.8 – Coeficiente de permeabilidade em função do tempo (S8).....	112
Figura 8.9 – Variação da permeabilidade média para as diferentes amostras compactadas .....	113
Figura 8.10 - Curva da difratometria de raios X antes da percolação .....	114
Figura 8.11 - Curva da difratometria de raios X após a percolação .....	115
Figura 8.12 - Amostras que percolaram o solo de Timbó.....	115
Figura 8.13 – Gráfico da DQO em função do tempo para ramo seco .....	116
Figura 8.15 – DQO em função do tempo para ramo úmido .....	117
Figura 8.16 – COT em função do tempo para ramo seco .....	118
Figura 8.17 – COT em função do tempo para $h_{ot}$ .....	118
Figura 8.18 – COT em função do tempo para ramo úmido .....	119

Figura 8.19 – pH em função do tempo para ramo seco .....	120
Figura 8.20 – pH em função do tempo para $h_{ot}$ .....	120
Figura 8.21 – pH em função do tempo para ramo úmido .....	120
Figura 8.22 – Sólidos em função do tempo para ramo seco .....	121
Figura 8.23 – Sólidos em função do tempo para $h_{ot}$ .....	121
Figura 8.24 – Sólidos em função do tempo para ramo úmido .....	122
Figura 8.25 – Concentração de ferro nos permeâmetros .....	123
Figura 8.26 – Concentração de zinco nos permeâmetros .....	123
Figura 8.27 – Concentração do cálcio nos permeâmetros .....	125

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Faixa de variação da composição de líquidos percolados .....	27
Tabela 3.2 – Capacidade de troca catiônica .....	31
Tabela 3.3 – Classificação dos solos de acordo com o coeficiente de permeabilidade .....	36
Tabela 3.4 – Valores orientados para solos ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ).....	43
Tabela 4.1 – Resumo dos solos .....	47
Tabela 4.2 – Ensaio físicos.....	48
Tabela 4.3 – Análises com o líquido percolado .....	50
Tabela 5.1 – Compactação da AM1 .....	60
Tabela 5.2 – Resumo dos valores de permeabilidade médios .....	64
Tabela 5.3 - Resultados da análise química do solo antes da percolação.....	65
Tabela 5.4 – Estatística Descritiva da DQO .....	70
Tabela 5.5 – Estatística Descritiva do COT .....	72
Tabela 5.6 – Estatística Descritiva do pH.....	74
Tabela 5.7 – Metais no líquido da entrada .....	78
Tabela 5.8 – Concentração do magnésio.....	80
Tabela 6.1 – Compactação da amostra AM2 .....	84
Tabela 6.2 – Resumo dos valores de permeabilidade .....	88
Tabela 6.3 - Resultados da análise química dos solos .....	89
Tabela 6.4 – Estatística Descritiva da DQO .....	92
Tabela 6.5 – Estatística Descritiva do COT .....	94
Tabela 6.6 – Estatística Descritiva do pH.....	95
Tabela 6.7 – Concentração do magnésio.....	100
Tabela 7.1 - Resultados da análise química dos solos .....	104
Tabela 8.1 – Compactação da amostra AM4 .....	107
Tabela 8.2 – Resumo dos valores de permeabilidade .....	112
Tabela 8.3 - Resultados da análise química dos solos .....	113
Tabela 8.4 – Estatística Descritiva da DQO .....	116
Tabela 8.5 – Estatística Descritiva do COT .....	118
Tabela 8.6 – Estatística Descritiva do pH.....	119
Tabela 8.7 – Concentração do magnésio.....	124
Tabela 8.8 – Concentração do manganês .....	124

Tabela 9.1 – Comparação entre os solos estudados .....	126
Tabela 9.2 – Comparação dos parâmetros físico-químicos do líquido percolado ...	128

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CIDASC	Companhia Integrada de Desenvolvimento Agrícola de Santa Catarina
COT	Carbono Orgânico Total
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DRX	Difração de Raio X
e	Índice de vazios
$h_{ot}$	Umidade Ótima
i	Gradiente hidráulico
IP	Índice de Plasticidade
k	Coefficiente de permeabilidade
Lareso	Laboratório de Pesquisas em Resíduos Sólidos
Lima	Laboratório Integrado do Meio Ambiente
LL	Limite de Liquidez
LMS	Laboratório de Mecânica dos Solos
LP	Limite de Plasticidade
n	Porosidade
pH	Potencial Hidrogeniônico
Q	Vazão
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## SUMÁRIO

RESUMO.....	3
ABSTRACT .....	4
1 INTRODUÇÃO .....	15
2 OBJETIVOS .....	17
2.1 Objetivo Geral.....	17
2.2 Objetivos Específicos.....	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1 Resíduos Sólidos.....	18
3.2 Aterro Sanitário.....	21
3.2.1 Camada de base.....	22
3.2.2 Camada de cobertura.....	24
3.3 Líquido Percolado.....	25
3.3.1 Características do Líquido Percolado.....	26
3.3.2 Análises físico-químicas com o líquido percolado.....	27
3.4 Solos.....	29
3.4.1 Compactação dos solos.....	31
3.4.2 Permeabilidade dos solos.....	34
3.4.3 Metais no solo.....	41
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
4.1 Amostras dos Solos.....	45
4.1.1 Ensaio físicos.....	47
4.1.2 Análises Químicas.....	48
4.1.3 Análises Micro-estruturais.....	48
4.2 Amostras de Líquido Percolado.....	49
4.3 Piloto Experimental de fluxo.....	50
4.3.1 Método de Compactação.....	51
4.3.2 Ensaio de Permeabilidade.....	53
4.4 Monitoramento do Piloto Experimental de Fluxo.....	56
5 RESULTADOS DA AM1.....	58
5.1 Caracterização do solo.....	58
5.2 Ensaio de permeabilidade.....	60
5.2.1 Água – Umidade Ótima.....	60

5.2.2 Líquido Percolado - Ramo Seco .....	61
5.2.3 Líquido Percolado - Umidade Ótima .....	62
5.2.4 Líquido Percolado - Ramo Úmido .....	63
5.2.5 Resumo .....	64
5.3 Análises químicas .....	65
5.4 Análises micro-estruturais .....	67
5.5 Análises com o líquido percolado .....	69
5.5.1 Demanda Química de Oxigênio (DQO).....	69
5.5.2 Carbono Orgânico Total (COT) .....	72
5.5.3 pH.....	74
5.5.4 Sólidos Totais, Fixos e Voláteis .....	76
5.5.5 Metais.....	78
6 RESULTADOS DA AM2.....	83
6.1 Caracterização do solo .....	83
6.2 Ensaio de permeabilidade .....	85
6.2.1 Ramo Seco .....	85
6.2.2 Umidade Ótima .....	86
6.2.3 Ramo Úmido .....	87
6.2.4 Resumo.....	87
6.3 Análises químicas.....	88
6.4 Análises micro-estruturais.....	90
6.5 Análises com o líquido percolado .....	91
6.5.1 Demanda Química de Oxigênio (DQO).....	92
6.5.2 Carbono Orgânico Total (COT).....	94
6.5.3 pH.....	95
6.5.4 Sólidos Totais, Fixos e Voláteis .....	97
6.5.5 Metais.....	98
7 RESULTADOS DA AM3.....	102
7.1 Classificação do solo .....	102
7.2 Ensaio de permeabilidade .....	103
7.3 Análises químicas.....	104
7.4 Análises micro-estruturais.....	105
8 RESULTADOS DA AM4.....	106
8.1 Caracterização do solo .....	106



8.2 Ensaio de permeabilidade .....	108
8.2.1 Água – Umidade Ótima .....	108
8.2.2 Líquido Percolado - Ramo Seco .....	109
8.2.3 Líquido Percolado - Umidade Ótima .....	111
8.2.4 Líquido Percolado - Ramo Úmido .....	111
8.2.5 Resumo.....	112
8.3 Análises químicas.....	113
8.4 Análises micro-estruturais.....	114
8.5 Análises com o líquido percolado .....	115
8.5.1 Demanda Química de Oxigênio (DQO).....	116
8.5.2 Carbono Orgânico Total (COT) .....	117
8.5.3 pH.....	119
8.5.4 Sólidos Totais, Fixos e Voláteis .....	121
8.5.5 Metais.....	122
9 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	126
10 CONCLUSÕES .....	129
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	131
APÊNDICES.....	136
APÊNDICE A – Exemplo do cálculo do coeficiente de permeabilidade .....	137
APÊNDICE B – Exemplo do cálculo do coeficiente de permeabilidade médio – AM1 Timbó .....	139
APÊNDICE C – Resultados das análises da AM1 .....	141
APÊNDICE D – Resultados das análises da AM2 e AM3 .....	145
APÊNDICE E – Resultados das análises da AM4.....	150

# 1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas ambientais encontrados atualmente está relacionado com o destino final dos resíduos sólidos. Com a decomposição dos resíduos, aliada a infiltração de água da chuva na célula do aterro, forma-se o líquido percolado, mais conhecido como “chorume”. Este líquido, devido sua alta concentração de contaminantes, precisa ser tratado para evitar a contaminação dos solos e aquíferos.

Existem vários tipos de contaminantes dos solos e das águas, como nitrato, fosfato, metais pesados (cádmio, cromo, mercúrio, chumbo), químicos orgânicos e ácidos inorgânicos. Estes contaminantes não são completamente degradados no solo e sim transformados em produtos intermediários, que podem ser tanto ou mais perigosos do que o composto inicial.

A melhor forma de disposição de resíduos é através de aterros sanitários, o que exige o atendimento de várias etapas para a realização da obra, como a seleção de área adequada, execução de sistemas de impermeabilização, drenagem e tratamento dos líquidos e gases gerados.

Este trabalho dará ênfase aos sistemas de impermeabilização das camadas de base e cobertura dos aterros sanitários. A camada de base deverá proteger a fundação do aterro, evitando a contaminação do lençol freático e do solo. A camada de cobertura faz parte do fechamento da célula do aterro, sendo responsável pelo controle de ar e águas pluviais na massa de resíduos e pela liberação de gases do aterro.

Para a realização desta pesquisa, estudaram-se quatro tipos de solos utilizados em três Aterros Sanitários de Santa Catarina (Timbó, Chapecó e Curitiba) como materiais de base e cobertura. O líquido percolado utilizado é proveniente do Aterro Sanitário de Biguaçu.

A primeira etapa do trabalho consistiu na caracterização dos solos. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC. Em seguida, passou-se a montagem dos permeômetros para simular a percolação do líquido no solo. Os permeômetros foram montados nas dependências do Laboratório de Pesquisas em Resíduos Sólidos. O monitoramento da permeabilidade deu-se durante 180 dias, com análise semanal dos parâmetros físico-químicos do líquido percolado.

Com esta pesquisa pretendeu-se avaliar a contaminação dos solos de aterros sanitários através da percolação do líquido percolado. Os solos foram compactados com diferentes graus de compactação e umidade para verificar esta influência na permeabilidade e no controle de poluentes. Durante este período de monitoramento, foram realizadas ainda análises com o líquido percolado (antes e durante a percolação) para verificar a presença de metais pesados (cromo, cádmio, cobre, chumbo) e avaliar a adsorção destes metais no solo.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Estudar o comportamento dos solos utilizados como material de base e cobertura de alguns aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos no Estado de Santa Catarina.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Realizar experimentos de fluxo através de permeâmetros com carga hidráulica variável;
- Determinar as propriedades físicas e químicas do líquido percolado;
- Determinar as propriedades mineralógicas dos solos, através da técnica de Difração ao Raio X, antes e após a percolação;
- Verificar a contaminação do solo após o contato com o líquido percolado;
- Avaliar o sistema de impermeabilização em relação ao grau de compactação.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Resíduos Sólidos

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos sólidos são “aqueles resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos, que resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e 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 águas, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face a melhor tecnologia disponível”.

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) compreendem aqueles produzidos pelas inúmeras atividades desenvolvidas em áreas com aglomerações humanas do município, abrangendo resíduos residencial, comercial, industrial, de estabelecimentos de saúde, limpeza pública e construção civil. Dentre os vários RSU gerados, os resíduos de origem domiciliar ou aqueles com características similares, como os comerciais e resíduos da limpeza pública são normalmente encaminhados para a disposição em aterros sob responsabilidade do poder municipal (CASTILHOS et al, 2003).

Segundo o Instituto Brasileiro de Administração Municipal (IBAM) o tratamento dos resíduos sólidos urbanos é definido como uma série de procedimentos destinados a reduzir o potencial poluidor dos resíduos sólidos, impedindo o descarte de lixo em local inadequado e/ou transformando-o em material inerte ou biologicamente estável.

O tratamento mais eficaz é o prestado pela própria população quando está empenhada em reduzir a quantidade de lixo, evitando o desperdício, reaproveitando os materiais, separando os recicláveis em casa e se desfazendo do lixo que produz de maneira correta (IBAM, 2001).

Além desses procedimentos, existem processos físicos e biológicos que objetivam estimular a atividade dos microorganismos que atacam o lixo, decompondo a matéria orgânica e causando poluição. Os tipos de tratamento dos resíduos sólidos domiciliares mais comuns são:

- **Compostagem:** processo natural de decomposição biológica de materiais orgânicos, de origem animal e vegetal, pela ação de microorganismos. Pode ser aeróbia ou anaeróbia, em função da presença ou não de oxigênio no processo;
- **Incineração:** é um processo de queima, na presença de excesso de oxigênio, no qual os materiais à base de carbono são decompostos, despreendendo calor e gerando um resíduo de cinzas (IBAM, 2001).

A destinação final dos RSU é um dos grandes problemas ambientais encontrados na sociedade. Ainda se verifica em muitos municípios, principalmente de pequeno porte, a existência de “lixões”, ou seja, locais em que o lixo é lançado diretamente sobre o solo sem qualquer tipo de controle e sem cuidados ambientais, poluindo tanto o solo quanto o ar e as águas subterrâneas e superficiais das vizinhanças.

A Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), realizada em 2000 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) mostra a situação da destinação final do lixo coletado no país: 47,1 % em aterros sanitários; 22,3 % em aterros controlados e 30,5 % em lixões; ou seja, mais de 69,0 % de todo o lixo coletado no país teria um destino final adequado em aterros sanitários e/ou aterros controlados (Fig. 3.1).

Em número de municípios, o resultado não é tão favorável: 63,66 % utilizam lixões e 32,2 % aterros adequados (13,8 % aterros sanitários, 18,4 % aterros controlados), sendo que 5 % não informaram para onde vão seus resíduos. Segundo a PNSB de 1989, o percentual de municípios que tinham um destino adequado dos resíduos era de apenas 10,7 %.

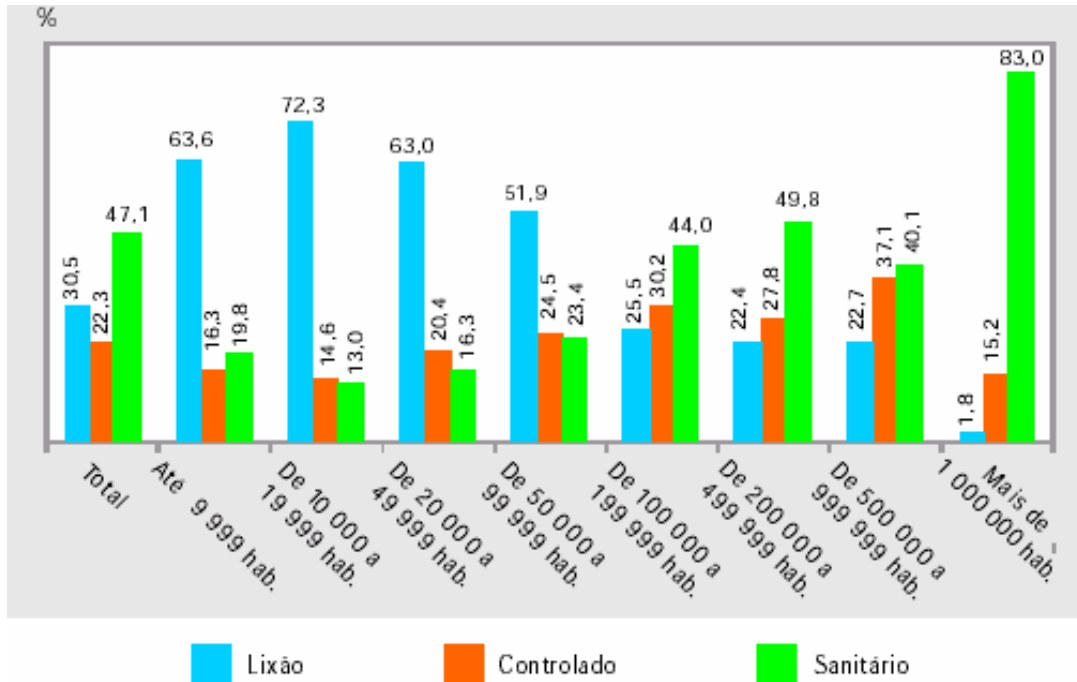


Figura 3.1 – Percentual do volume de lixo coletado, por tipo de destino final, segundo os estratos populacionais dos municípios – 2000.

Fonte: IBGE (2002).

Os lixões, além dos problemas sanitários com a proliferação de vetores de doenças, geração de maus odores, poluição dos solos e das águas, também constituem um sério problema social, porque acabam atraindo os "catadores", indivíduos que fazem da catação do lixo um meio de sobrevivência (IBAM, 2001).

Diante desse quadro, a única forma de dar um destino final adequado aos resíduos sólidos é através de aterros, sejam eles sanitários ou controlados. Todos os demais processos ditos como de destinação final (usinas de reciclagem, compostagem e incineração) são processos de tratamento do lixo e não prescindem de um aterro para a disposição de seus rejeitos (IBAM, 2001).

Segundo a NBR 8849 (1985), o aterro controlado de resíduos sólidos urbanos é "a técnica de disposição de resíduos sólidos municipais no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e a sua segurança, minimizando os impactos ambientais". Geralmente não dispõe de impermeabilização de base (comprometendo a qualidade das águas subterrâneas) nem de sistemas de tratamento do percolato ou do biogás gerado (IPT, 2000).

Segundo IBAM (2001), no aterro controlado, por não possuir sistema de coleta de chorume, esse líquido fica retido no interior da célula. Assim, é conveniente que o volume de água de chuva que entra no aterro seja o menor possível, para minimizar a quantidade de chorume gerado. Isso pode ser conseguido empregando-se material argiloso para efetuar a camada de cobertura provisória e executando-se uma camada de impermeabilização superior quando o aterro atinge sua cota máxima operacional. Também é conveniente que a área de implantação do aterro controlado tenha um lençol freático profundo, a mais de três metros do nível do terreno.

Segundo Jucá (2003), os aterros sanitários representam, com algumas poucas exceções, a principal destinação final dos resíduos sólidos, apesar do imenso esforço em reduzir, reutilizar e reciclar. No Brasil já existe um enorme número de aterros sanitários, principalmente nas regiões Sudeste e Sul. Por outro lado nas demais regiões os aterros sanitários são praticamente inexistentes. Isto pode ser explicado pelos altos custos de operação de um aterro sanitário, que pressupõe tratamento adequado de líquidos e gases efluentes, além dos cuidados previstos nas normas técnicas.

### **3.2 Aterro Sanitário**

O aterro sanitário é um processo utilizado para a disposição de resíduos sólidos no solo, particularmente lixo domiciliar que permite um confinamento seguro em termos de controle de poluição ambiental e proteção à saúde pública. Outra definição o apresenta como forma de disposição final de resíduos sólidos urbanos no solo, mediante confinamento em camadas cobertas com material inerte, geralmente solo de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais (IPT, 2000).

Na Fig. 3.2 observa-se a seção de um aterro sanitário, segundo o Manual de Operação de Aterros Sanitários desenvolvido pela Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia – CONDER. Destaca-se a presença da camada impermeabilizante da base e cobertura, a drenagem do líquido percolado e dos gases gerados; sistemas executados exclusivamente nos aterros sanitários.



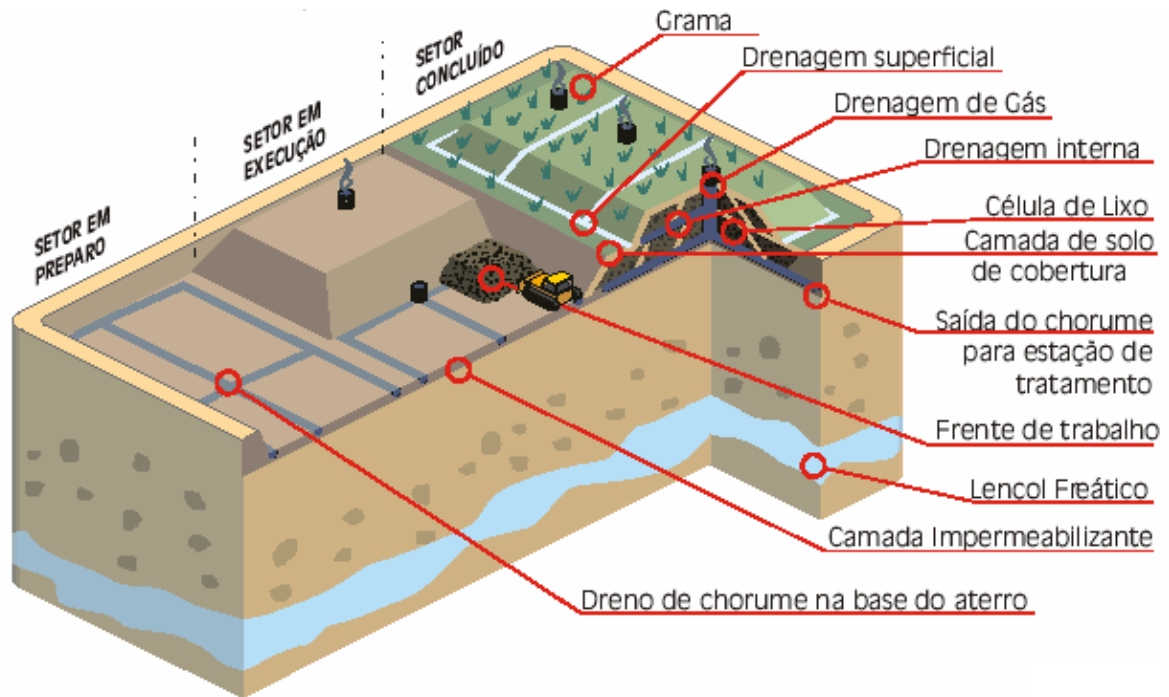


Figura 3.2 – Corte de uma seção de um aterro sanitário  
Fonte: CONDER (2002).

### 3.2.1 Camada de base

A impermeabilização da base dos aterros sanitários de RSU, bem como das laterais, atua como uma barreira que isola os resíduos e protege a fundação do aterro, evitando-se a contaminação do subsolo e aquíferos subjacentes, pela migração de percolados e/ou biogás (WORKMAN, 1989; IPT, 2000; QIAN et al, 2002).

A NBR 13896 de 1997 define a impermeabilização como a “deposição de camadas de materiais artificiais ou naturais, que impeça ou reduza substancialmente a infiltração de água no solo dos líquidos percolados, através da massa de resíduos”. Esta norma recomenda que “é desejável a existência, no local a ser implantado o aterro sanitário, de um depósito natural extenso e homogêneo de materiais com coeficiente de permeabilidade inferior a  $10^{-6}$  cm/s e uma zona não saturada com espessura superior a 3,0 m”; em outro ponto define que “entre a superfície inferior do aterro e o mais alto nível do lençol freático deve haver uma camada natural de espessura mínima de 1,50 m de solo insaturado”. Recomenda também que “sempre que as condições hidrogeológicas do local não atenderem às especificações citadas deve ser implantada uma camada impermeabilizante”.

Os serviços de impermeabilização inferior do aterro devem ser iniciados logo após a conclusão da remoção da camada de solo superficial da área operacional. Estes serviços consistem na instalação da manta de polietileno de alta densidade (PEAD) ou na execução de uma camada de solo argiloso com coeficiente de permeabilidade inferior a  $10^{-6}$  cm/s (IBAM, 2001).

Para o emprego de revestimentos minerais, segundo Gomes (2003), as técnicas de controle de qualidade enfocam três componentes cruciais: utilizar materiais apropriados na construção do revestimento; dispor e compactar os materiais adequadamente; garantir que a camada está adequadamente protegida de possíveis danos.

Ainda segundo Gomes (2003), os requerimentos recomendados para alcançar a condutividade hidráulica ( $k$ ) menor ou igual a  $10^{-7}$  cm/s são:

- porcentagem de finos (peso seco passante na peneira 200):  $\geq 20\%$ , idealmente  $\geq 30\%$ ;
- porcentagem de pedregulhos (peso seco retido na peneira 4):  $\leq 30\%$ ;
- índice de plasticidade:  $\geq 7\%$ , idealmente  $\geq 10\%$ ;
- tamanho máximo de partícula:  $\leq 50\text{mm}$ , idealmente  $\leq 25\text{mm}$ .

Segundo Workman (1989), a permeabilidade do solo a ser utilizado em uma camada impermeabilizante é o fator mais importante para a determinação da eficiência a longo prazo. Solos argilosos com permeabilidade inferior a  $10^{-7}$  cm/s são comumente considerados adequados para fornecer proteção a longo prazo ao meio ambiente.

O solo deve ser compactado em camadas com espessura não superior a 30 cm, mas idealmente de 20 cm. Antes de lançar a próxima camada de solo, a superfície compactada deve ser escarificada (ranhuras de 2 a 3 cm) a fim de garantir adequada ligação e evitar a formação de zonas preferenciais de fluxo entre as camadas. Após a compactação, o solo deve ser protegido do ressecamento superficial, que pode causar fissuras. Para tanto, pode-se cobri-lo temporariamente o solo com uma lona plástica ou molhar periodicamente a área.

Em aterros de RSU emprega-se geomembranas (membranas sintéticas) na composição de estruturas de base e cobertura como elemento de impermeabilização. Em geral, elas são sobrepostas a uma camada de solo compactado, com espessura mínima de 60 cm e  $k < 10^{-7}$  cm/s. Em caso de dano na geomembrana, o solo impede o vazamento do líquido. Por outro lado, a presença da geomembrana reduz a exposição do solo ao lixiviado (Gomes, 2003).

### 3.2.2 Camada de cobertura

O sistema de cobertura (diário, intermediário e final) tem a função de eliminar a proliferação de vetores; diminuir a taxa de formação de percolados; reduzir a exalação de odores; impedir a catação; permitir o tráfego de veículos sobre o aterro; eliminar a queima de resíduos e a saída descontrolada do biogás. Entre outras características, o sistema de cobertura deverá ser resistente a processos erosivos e ser adequado à futura utilização da área (HOEKS, 1989; IPT, 2000).

Segundo Jucá (2003), a camada de cobertura dos resíduos é o elo entre o lixo e o ambiente atmosférico. Por isso, esta camada apresenta grande capacidade de influência tanto na liberação de gases do aterro, como na entrada de ar atmosférico e águas pluviais na massa de lixo.

A NBR 13896 (1997) refere-se ao sistema de cobertura final como o responsável pela minimização da infiltração de água na célula, devendo exigir pouca manutenção, não estar sujeito à erosão, acomodar assentamento sem fratura e possuir um coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da área do aterro.

A cobertura diária é realizada ao fim de cada jornada de trabalho (0,20 m de espessura de solo) e a cobertura intermediária é necessária naqueles locais onde a superfície de disposição ficará inativa por períodos mais prolongados (aproximadamente um mês), aguardando, por exemplo, a conclusão de um patamar para início do seguinte (GOMES, 2003).

Na Fig. 3.3 observa-se a representação de um sistema de cobertura final, o qual protegerá as células contra a infiltração da água da chuva; e de cobertura diária.

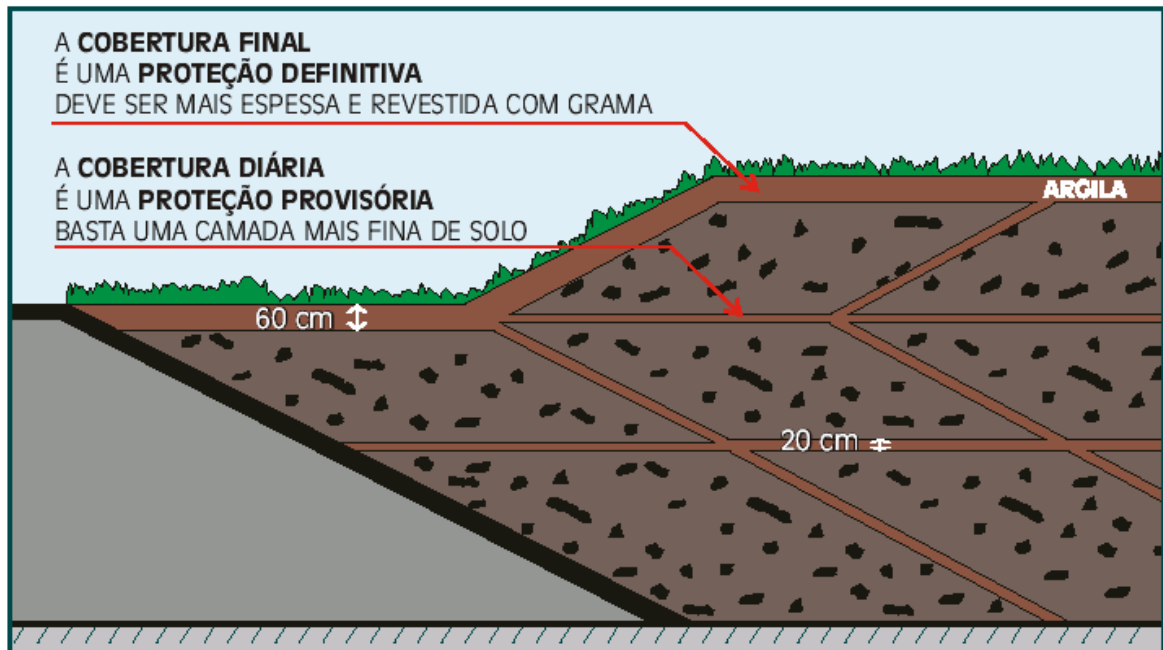


Figura 3.3 – Sistemas de cobertura final e diária  
Fonte: CONDER (2002).

### 3.3 Líquido Percolado

O líquido percolado (conhecido como chorume, sumeiro, chumeiro, lixiviado, ou percolado) é um líquido escuro, turvo e malcheiroso proveniente do armazenamento e tratamento do lixo. A geração do líquido percolado e seu escoamento sem o tratamento e disposição adequados, são um dos problemas ambientais e de saúde pública mais relevantes associados ao lixo (IPT, 2000).

A NBR 8419 (1992) define o líquido percolado como sendo um líquido produzido pela decomposição de substâncias contidas nos resíduos sólidos, com cor escura, mau cheiro e elevada DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio).

Segundo IPT (2000) a produção do líquido percolado é inevitável pois não é possível o controle total sobre todas as fontes de umidade que interagem com resíduo sólido. Estas fontes podem ser: a própria umidade inicial do lixo; a água gerada no processo de decomposição biológica e a água da chuva que percola pela camada de cobertura.

Destas três fontes, o volume correspondente à água da chuva supera em relevância as demais, sendo que a camada de cobertura deve ser relativamente impermeável e o sistema de drenagem superficial deve afastar o escoamento superficial das áreas adjacentes.

Segundo Castilhos (1991), os principais fatores que afetam a geração dos percolados são:

- precipitação: principal fonte de líquidos percolados nos aterros;
- escoamento superficial: a água que escorre na superfície do aterro sem infiltrar. Sofre influência da topografia do terreno, tipo de solo e presença de cobertura vegetal;
- evapotranspiração: o volume de água que evapora através da transpiração das plantas sobre a cobertura do aterro;
- infiltração: o fluxo de água que atravessa o aterro, influenciado pelas características do material de cobertura (porosidade), dos resíduos e condições de drenagem;
- capacidade de retenção de água: a água da chuva infiltrada provocará a umidificação dos resíduos até sua máxima capacidade de retenção, além da qual, volumes importantes de percolados podem se formar;
- grau de compactação do solo: tipo de compactação do solo;
- composição dos resíduos: os materiais depositados em aterros constituem fonte potencial de carga de elementos orgânicos e inorgânicos que podem ser lixiviados nos líquidos percolados;
- idade dos resíduos: influencia nas concentrações dos componentes dos líquidos percolados.

### 3.3.1 Características do Líquido Percolado

O líquido percolado é constituído basicamente por água rica em sais, metais pesados e matéria orgânica, podendo a concentração dessa última chegar a níveis de até 100 vezes o valor da concentração de matéria orgânica em esgotos domésticos. As concentrações desses constituintes variam de acordo com a

composição dos próprios resíduos sólidos depositados e com as condições ambientes como umidade, oxigênio disponível, temperatura e pH (COSTA, 2002).

A principal característica do líquido percolado é a variabilidade de sua composição em decorrência do esgotamento progressivo da matéria orgânica biodegradável. Por essa razão, o elevado potencial poluidor do "chorume novo" vai se reduzindo até atingir níveis que dispensam seu tratamento.

Na Tabela 3.1 observam-se as faixas de variação de alguns parâmetros de líquidos percolados de aterros sanitários brasileiros.

**Tabela 3.1 – Faixa de variação da composição de líquidos percolados**

Parâmetros	Faixa de variação	
	Mínimo	Máximo
pH (un)	5,9	8,7
DQO	966,0	28.000,0
DBO <sub>5</sub>	480,0	19.800,0
Cobre	0,0	1,2
Chumbo	0,0	2,3
Ferro	0,2	6.000,0
Manganês	0,1	26,0
Zinco	0,1	35,6
Cádmio	0,0	0,2
Cromo total	0,0	3,9

Nota: Todas as unidades em mg/l, exceto onde indicado.

Fonte: IBAM (2001).

### 3.3.2 Análises físico-químicas com o líquido percolado

CASTILHOS et al. (2003) afirmam que as principais análises realizadas no monitoramento de águas subterrâneas e superficiais com o objetivo de detectar possíveis contaminações por líquidos percolados são: DBO, DQO, sólidos, oxigênio dissolvido, pH e metais.

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) representa um dos principais parâmetros de contaminação existentes nos líquidos percolados, indicando a carga de matéria orgânica transportada e a quantidade de oxigênio necessária para sua estabilização. A DQO é diretamente proporcional à poluição de um corpo d'água, ou seja, rios altamente poluídos têm DQO elevada.

Em geral as amostras altamente poluídas apresentam valores elevados de DQO, podendo atingir valores acima de 80.000 mg/l, no caso de um aterro sanitário.

O Carbono Orgânico Total (COT) é uma medida direta da matéria orgânica, enquanto a DQO é uma medida indireta. O teste mede todo o carbono liberado na forma de CO<sub>2</sub> (VON SPELING, 1996).

A determinação dos sólidos totais, fixos e voláteis permite verificar o teor de matéria orgânica presente e os elementos que não se volatilizam à temperatura de 550° C. Fisicamente os sólidos estão classificados segundo suas dimensões: sólidos dissolvidos (dimensões inferiores a 2,0 µm) e sólidos em suspensão (dimensões superiores a 2,0 µm). Do ponto de vista químico, os sólidos são classificados em voláteis (se volatilizam a temperatura inferiores a 65° C) e fixos (permanecem após a completa evaporação da água – calcinação a 550° C) (LAURENTI, 1997).

Os sólidos voláteis são geralmente usados como estimativa dos sólidos orgânicos, embora alguns sais minerais (cloretos, nitratos e carbonatos) sejam perdidos durante a calcinação. Elevado teor de sólidos voláteis confirma a fase inicial de decomposição e aponta para uma grande quantidade de matéria orgânica.

A medida do pH é um dos testes mais importantes para a caracterização físico-química dos líquidos percolados, interferindo diretamente na estabilidade e solubilidade de metais. O pH pode ser determinado de várias formas, utilizando indicadores e papéis indicadores, colorimetricamente ou potenciometricamente. O método mais utilizado é o potenciométrico, através de um instrumento chamado pHmetro.

REIS & ELLWANGER (2004) citam que os metais pesados, principalmente cádmio, cobre, chumbo e zinco, estão presentes na fração orgânica do composto do resíduo urbano, em concentrações relativamente elevadas.

➤ Chumbo: destruição de hemoglobina dos peixes e retarda o crescimento de vários organismos. No homem é acumulativo podendo causar enfermidades como anemias, problemas renais, paralisia, melancolia, glaucoma e outras doenças.

- Zinco: a presença de zinco em águas para consumo é controlada, pois quando ultrapassa o valor de 15 mg/l nos padrões brasileiros, confere à água sabor desagradável. O óxido de zinco é muito utilizado na confecção de tintas, produtos de borracha, cosméticos, e indústria farmacêutica. As principais fontes poluentes de zinco no solo são as atividades de mineração, uso agrícola de lodo de esgoto, resíduos e subprodutos de processos industriais e uso de fertilizantes. Para os peixes é tóxico em concentrações a partir de 4 mg/l;
- Cromo: largamente empregados na indústria, principalmente os hexavalentes, porém as formas trivalentes são consideradas inócuas a saúde, há evidências de que os cromatos, em doses elevadas têm efeito corrosivo no aparelho digestivo e produzem nefrite.

### 3.4 Solos

Os solos são materiais que resultam do intemperismo das rochas, por desintegração mecânica (através de agentes como água, temperatura, vento e vegetação) ou decomposição química (modificação química ou mineralógica das rochas de origem). Por desintegração mecânica formam-se os pedregulhos e areias (partículas grossas), siltes (partículas intermediárias) e, somente em condições especiais, as argilas. Por decomposição química formam-se as argilas (partículas finas).

O solo é constituído por partículas sólidas, deixando entre si vazios que podem estar parcial ou totalmente preenchidos por água (LAMBE, 1969).

#### a) Minerais

Segundo Caputo (1988), os minerais encontrados nos solos são os mesmos da rocha de origem, além de outros que se formam na decomposição. Os minerais podem ser agrupados, quanto à composição química, em:

- silicatos – feldspato, mica, quartzo, serpentina, clorita, talco;
- óxidos – hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), limonita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ );
- carbonatos – calcita ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ), dolomita ( $(\text{CO}_3)_2\text{CaMg}$ );



- sulfatos – gesso, anidrita.

O quartzo é o mais importante dos minerais do grupo silicatos. Composto por sílica cristalina pura ( $\text{SiO}_2$ ), seus cristais são em forma de um prisma hexagonal, com pirâmides hexagonais nas bases.

As argilas apresentam uma complexa constituição química, distinguindo-se três grupos principais: caolinitas, montmorilonitas e ilitas. As caolinitas ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ou  $\text{H}_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_9$ ) são formadas por unidades de silício e alumínio que se unem formando uma estrutura rígida, sendo relativamente estáveis em presença de água.

As montmorilonitas  $[(\text{OH})_4\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{20}n\text{H}_2\text{O}]$  são formadas por uma unidade de alumínio entre duas de silício. A ligação entre estas unidades não é suficiente firme para impedir a passagem de água, tornando-se as argilas muito expansivas.

As ilitas  $[(\text{OH})_4\text{K}_y(\text{Si}_{8-y}\text{Al}_y)(\text{Al}_4\text{Fe}_4\text{Mg}_4\text{Mg}_6)\text{O}_{20}]$  possuem estruturas semelhantes às montmorilonitas, porém são menos expansivas.

### **b) Capacidade de Troca Catiônica (CTC)**

Em contato com a água as partículas sólidas atraem seus íons positivos  $\text{H}^+$ , formando uma película de água adsorvida, denominada camada adsorvida. A troca de base é o que se refere à facultade das partículas coloidais permutarem os cátions adsorvidos em sua superfície. No solo, nem todos os cátions adsorvidos são permutáveis; a quantidade que o define é sua capacidade de troca (CAPUTO, 1988).

A capacidade de troca catiônica dos minerais de uma argila ocorre em consequência do desequilíbrio das cargas elétricas determinadas pela substituição isomórfica no próprio reticulado cristalino, por ligações químicas quebradas nas arestas das partículas e pela substituição de hidrogênio por hidroxilas.

Segundo Van Raij (1991), os materiais responsáveis pela troca de íons em solos são: matéria orgânica, minerais de argila e os óxidos de ferro e alumínio. Os minerais de argila que têm importante carga permutante são: illita, montmorilonita e

vermiculita (CTC igual a 40, 120 e 150 meq/100 g respectivamente). Esta alta capacidade de troca deve-se, em parte, à propriedade de expansão que apresentam, o que permite a participação de superfícies internas nos processos de troca iônica.

A caulinita tem capacidade de troca catiônica relativamente baixa (menor que 10 meq/100 g de material). A Tabela 3.2 apresenta alguns valores da CTC para solos.

**Tabela 3.2 – Capacidade de troca catiônica**

<b>Argila</b>	<b>CTC (meq/100 g argila)</b>
Caulinita	3-15
Haloisita 2H <sub>2</sub> O	5-10
Haloisita 4H <sub>2</sub> O	10-40
Ilita	10-40
Clorita	10-40
Sepiolita – atapulgita	20-35
Esmectita	80-150
Montmorilonita	80-200
Vermiculita	100-150

Fonte: Aguiar e Novaes (2002)

Os sais livres na solução dos solos são responsáveis por diversos fenômenos: absorção de íons pelas plantas, salinidade e lixiviação. Os cátions trocáveis são retidos pelo solo na seguinte ordem:  $Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+} > Na^{+}$  (VAN RAIJ, 1991).

A superfície da partícula sólida dos solos possui uma carga elétrica negativa com intensidade dependente das características mineralógicas do solo.

#### 3.4.1 Compactação dos solos

A compactação do solo serve para tornar o aterro mais homogêneo e aumentar a intimidade de contato entre os grãos, reduzindo assim o índice de vazios, aumentando a densidade, e com isso, melhorando várias propriedades do solo.

São três as relações importantes de volume: porosidade (n), índice de vazios (e) e grau de saturação (S). A porosidade é a relação entre o volume de vazios pelo volume total. O índice de vazios é a relação entre o volume de vazios pelo volume

de sólidos. E o grau de saturação indica a porcentagem de água contida nos seus vazios (LAMBE, 1969).

Através do conhecimento do tipo de solo a ser utilizado para a compactação e do tipo de obra, poderá ser definida a umidade em que o solo deve se encontrar na ocasião e a densidade a ser atingida, objetivando reduzir futuros recalques, aumentar a rigidez e a resistência do solo e reduzir a permeabilidade.

Proctor, em 1933, iniciou o estudo sobre a compactação e mostrou que ao aplicar certa energia de compactação a massa específica resultante é função da umidade em que o solo estiver. Quando a compactação é realizada com baixas umidades, o atrito entre as partículas é muito alto e não se consegue uma significativa redução dos vazios. Para umidades mais elevadas, a água provoca um efeito de lubrificação entre as partículas, que deslizam entre si, acomodando-se num arranjo mais compacto.

A partir de um determinado teor de umidade a compactação não consegue mais expulsar o ar dos vazios, pois o grau de saturação já é elevado e o ar está envolto por água. Há, para a energia aplicada, um certo teor de umidade (umidade ótima) que conduz a uma massa específica máxima ou densidade máxima.

Segundo Pinto (2000), as propriedades dos solos compactados dependem da umidade e do processo de compactação, resultando o peso específico seco, o grau de saturação e a estrutura do solo. Estes parâmetros são responsáveis pela variação do coeficiente de permeabilidade no campo. Pode-se ter um solo com baixa permeabilidade, porém, se o processo de compactação não for adequado, pode-se ter um solo com permeabilidade maior que a desejada.

Para verificar a influência destes fatores nas propriedades mecânicas dos solos compactados podem-se moldar vários corpos de prova com diferentes teores de umidade e densidade, com energias de compactação adequadas para cada situação. A curva de compactação do ensaio é representada através de um gráfico da densidade seca em função da umidade. Assim pode-se verificar como os

parâmetros de compactação (umidade e densidade) influenciam na característica determinada.

Segundo Lambe (1969), a compactação de um solo influencia na sua estrutura. Para uma determinada energia de compactação e densidade seca, o solo tende a ser mais floculado no ramo seco da curva de compactação (ponto A) do que no ramo úmido (ponto C) (Fig. 3.4). Para um mesmo teor de umidade, o aumento da energia de compactação tende a dispersar o solo, especialmente no ramo seco da curva (pontos A e E) e até certo ponto no ramo úmido (pontos C e D). O aumento do teor de umidade tende a aumentar a repulsão entre partículas, permitindo assim um arranjo mais ordenado das partículas de solo para uma determinada energia de compactação. Aumentando a energia de compactação para um teor de umidade, as partículas tendem a trabalhar em um arranjo quase que paralelo.

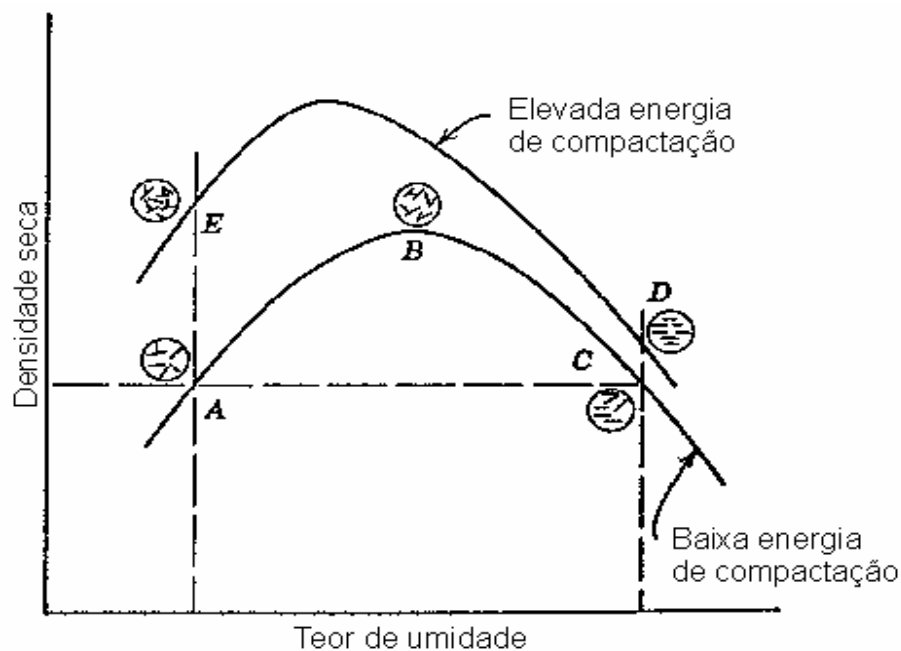


Figura 3.4 – Efeitos da compactação na estrutura do solo  
Fonte: Adaptado de Lambe (1969)

O aumento no teor de umidade do solo resulta na diminuição da permeabilidade no ramo seco da curva de compactação e em um pequeno aumento no ramo úmido da curva (Fig. 3.5). Aumentando a energia de compactação, a permeabilidade diminui para um aumento de densidade seca, reduzindo os vazios disponíveis para o fluxo, e aumentando a orientação das partículas (LAMBE, 1969).

Ritter et al (2002) realizou ensaios de permeabilidades de carga variável com amostras de solo compactadas no ramo seco e no úmido da curva de compactação. Os resultados indicaram valores de permeabilidade no ramo úmido da curva de compactação cerca de 40 % menor que no ramo seco. Com base neste resultado o autor recomenda que, no campo, o material seja sempre compactado no ramo úmido da curva de compactação, pois nesta situação a permeabilidade é menor.

Workman (1989) também recomendam que a compactação do solo seja no ramo úmido da curva de compactação.

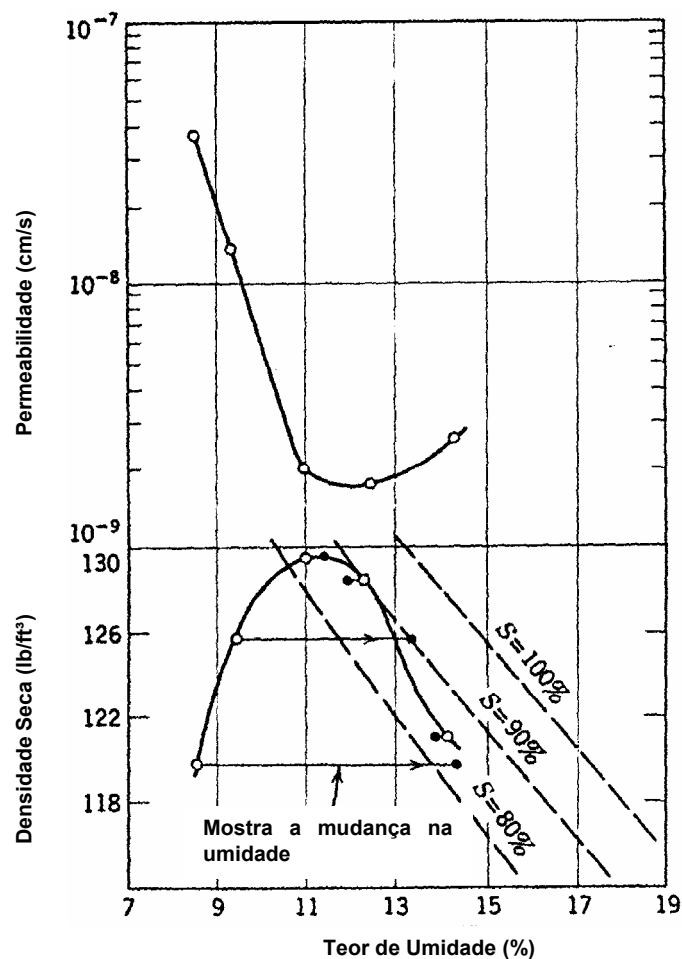


Figura 3.5 – Efeitos da compactação na estrutura do solo  
Fonte: Lambe (1969)

### 3.4.2 Permeabilidade dos solos

Segundo Caputo (1988), a permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento da água através dele, sendo o seu grau de permeabilidade expresso pelo “coeficiente de permeabilidade”. O conhecimento da permeabilidade

de um solo é de grande importância em diversos problemas práticos da engenharia, como drenagem, rebaixamento do nível d'água e recalques.

Segundo Pinto (2000), Darcy em 1850 realizou um estudo para verificar como alguns fatores geométricos influenciavam na vazão da água, o que gerou a seguinte equação:

$$Q = k \times \frac{h}{L} \times A \quad (3.1)$$

onde:

$Q$  = vazão;

$A$  = área;

$k$  = constante de permeabilidade.

O gradiente hidráulico  $i$  é representado pela relação da carga que dissipa na percolação  $h$  pela distância ao longo da qual a carga se dissipa  $L$ .

$$Q = k \times i \times A \quad (3.2)$$

A velocidade de percolação  $v$  é a razão da vazão ( $Q$ ) pela área ( $A$ ), ou seja:

$$v = k \times i \quad (3.3)$$

Através da Equação 3.3 observa-se que o coeficiente de permeabilidade indica a velocidade de percolação da água quando o gradiente é um. Normalmente é expresso em [cm/s].

A Lei de Darcy é válida para um escoamento laminar, ou seja, as trajetórias das partículas d'água não se cortam.

Lambe (1969) apresenta os valores de permeabilidades e sua classificação quanto ao grau de permeabilidade, conforme a Tabela 3.3. O valor de permeabilidade recomendado pela norma ( $k < 10^{-6}$  cm/s) para os solos de camadas de impermeabilização está classificado como permeabilidade muito baixa.

Tabela 3.3 – Classificação dos solos de acordo com o coeficiente de permeabilidade

Grau de Permeabilidade	Coeficiente de permeabilidade (cm/s)
Alta	Acima de $10^{-1}$
Média	$10^{-1}$ a $10^{-3}$
Baixa	$10^{-3}$ a $10^{-5}$
Muito baixa	$10^{-5}$ a $10^{-7}$
Praticamente impermeável	Menor que $10^{-7}$

Fonte: Adaptado de Lambe (1969)

Segundo Caputo (1988) e Pinto (2000) há várias maneiras para determinar o coeficiente de permeabilidade dos solos, como:

➤ **Permeâmetro de carga constante:** utilizado para solos mais permeáveis (solos arenosos). Neste ensaio mede-se a quantidade de água, mantida a nível constante, que atravessa a amostra de solo durante um determinado tempo. O coeficiente de permeabilidade é calculado diretamente pela Lei de Darcy.

$$k = \frac{Q \times L}{A \times h \times t} \quad (3.4)$$

onde:

Q = quantidade de água (cm<sup>3</sup>);

A = área do permeâmetro (cm<sup>2</sup>);

L = altura da amostra (cm);

h = carga hidráulica dissipada na percolação (desnível entre entrada e saída da água) (cm);

t = tempo.

➤ **Permeâmetro de carga variável:** utilizado para solos menos permeáveis ( $k < 10^{-3}$  cm/s). Mede-se o tempo t que o líquido no tubo leva a percorrer a altura  $h_i$  até a  $h_f$ .

$$k = 2,3 \frac{a \times H}{A \times \Delta t} \log \frac{h_1}{h_2} \quad (3.5)$$

onde:

k = coeficiente de permeabilidade (cm/s);

a = área interna do tubo de vidro (cm<sup>2</sup>);

H = altura inicial do corpo-de-prova (cm);

A = área do corpo-de-prova (cm<sup>2</sup>);

$\Delta t$  = 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).

➤ **Ensaio de campo:** determinado através de sondagem de simples reconhecimento, sendo que, quando encher o tubo de revestimento, deve-se manter o seu nível e medir a vazão para o cálculo do coeficiente de permeabilidade. Este tipo de ensaio é menos preciso que o ensaio de laboratório devido os parâmetros necessários para a realização do ensaio (posição do nível d'água, espessura das camadas...).

➤ **Métodos indiretos:** através do ensaio de adensamento.

O coeficiente de permeabilidade dos solos depende dos seguintes fatores:

- **Influência do índice de vazios:** para um mesmo solo, quanto maior seu índice de vazios, maior será a permeabilidade.
- **Influência do tamanho das partículas:** quanto mais fino for o solo, menor o valor da permeabilidade, portanto, as partículas mais finas do solo têm influência na permeabilidade.
- **Influência da composição do solo:** os argilominerais constituintes de um solo têm grande influência na permeabilidade do mesmo. Segundo Lambe (1969) considerando dois solos com mesmo índice de vazios, os que apresentam composição predominante de montmorilonita apresenta permeabilidade 100 vezes menor que os compostos por caolinitas, tal fato demonstra a grande influência dos argilominerais na permeabilidade de um solo.
- **Influência do grau de saturação:** o coeficiente de permeabilidade de um solo não saturado é menor do que um solo saturado. Isso ocorre devido à presença de ar em um solo não saturado. As bolhas de ar existentes tornam-se um obstáculo para o fluxo de água. Assim, quanto maior o grau de saturação, maior a permeabilidade (PINTO, 2000).



- **Influência da estrutura e anisotropia:** além da permeabilidade depender da quantidade de vazios do solo, ela depende também da disposição relativa dos grãos. Para solos compactados mais secos, por exemplo, a disposição das partículas (estrutura floculada) permite maior passagem de água do que quando compactado mais úmido (estrutura dispersa), com mesmo índice de vazios (LAMBE, 1969; PINTO, 2000). O solo, geralmente, não é isotrópico com relação à permeabilidade. Isso significa que o valor do coeficiente de permeabilidade na horizontal e na vertical de um solo pode ser diferente.

- **Influência da temperatura:** o coeficiente de permeabilidade depende ainda do peso específico e da viscosidade do líquido. Estas duas propriedades variam com a temperatura, sendo que a viscosidade varia bem mais do que o peso específico. Quanto maior a temperatura, menor é a viscosidade do líquido percolante, e, portanto, mais facilmente ela escoar pelos vazios do solo com o correspondente aumento do coeficiente de permeabilidade;  $k$  é, pois, inversamente proporcional à viscosidade da água (CAPUTO, 1988).

Assim, adotou-se o coeficiente referido à água na temperatura de 20° C. Registra-se a temperatura da água durante o ensaio e calcula-se o coeficiente equivalente à temperatura de 20° C através da Equação 3.6:

$$k_{20^{\circ}C} = k_T \frac{\eta_T}{\eta_{20^{\circ}}} \quad (3.6)$$

onde:

$T$  = temperatura de ensaio;

$\eta$  = viscosidade da água (à temperatura de ensaio  $T$  e de 20 °C).

Esta equação pode ser empregada de forma semelhante para estimar a permeabilidade do solo a outro líquido que não a água, considerando que ela é proporcional ao peso específico do líquido e inversamente proporcional à sua viscosidade.

Rabe (2003) realizou estudos sobre o comportamento geomecânico de um solo argiloso mole e um solo residual, submetidos às variações de temperaturas. Através deste estudo, concluiu-se que o peso específico da água permaneceu praticamente

constante, enquanto a viscosidade diminuiu com o aumento da temperatura. A 50° C, a viscosidade da água ( $\eta$ ) é reduzida em torno de 45 % em relação ao valor de  $\eta$  a 20° C. A 70° C, a redução de  $\eta$  é da ordem de 60 %.

Com os solos estudados, Rabe (2003) concluíram ainda que o valor do coeficiente de permeabilidade aumenta de forma pouco significativa com o aumento da temperatura. Para os níveis mais baixos de tensões efetivas este aumento foi um pouco mais relevante. Obteve variações de 0,34 % /°C para a argila e de 0,12 % /°C para o solo residual (Fig. 3.6).

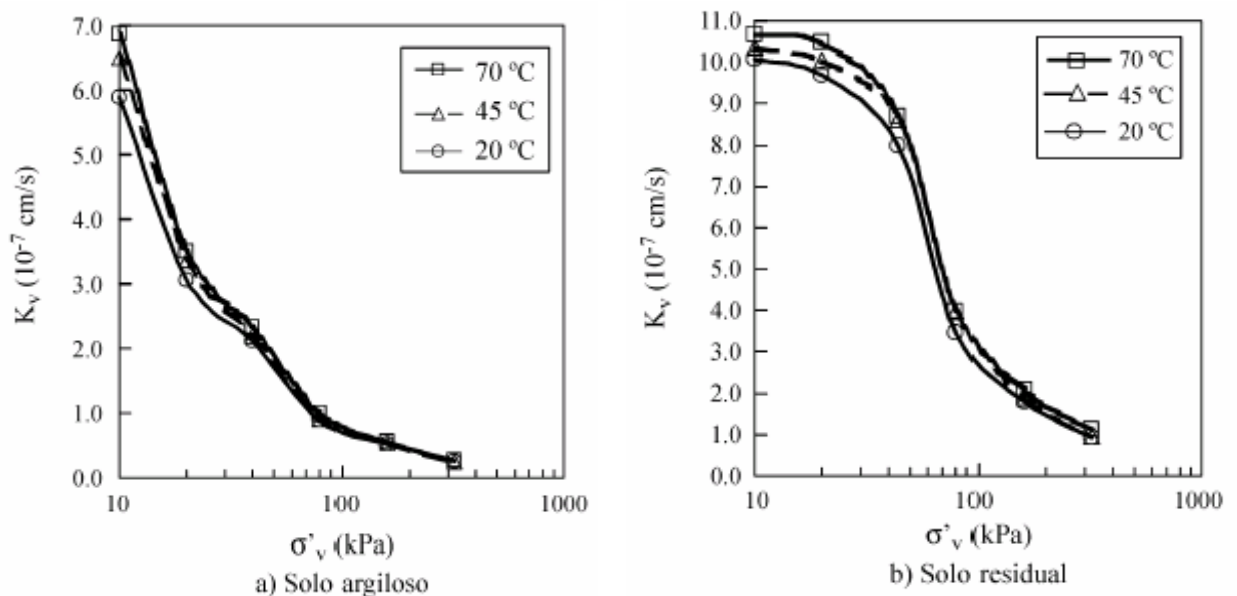


Figura 3.6 – Coeficiente de permeabilidade X tensão efetiva para diferentes temperaturas.  
Fonte: RABE et al (2003).

O uso de solos com baixa permeabilidade para contenção de contaminantes está sendo uma prática muito comum. Vários autores estudaram a interação do líquido percolado de aterros sanitários de resíduos sólidos com os solos utilizados para impermeabilização. O objetivo destes estudos foi verificar as contaminações que estes líquidos possam causar ao meio ambiente, devido a sua elevada carga de poluentes orgânicos e inorgânicos. Dentre estes autores, destacam-se: Eklund (1985), Daniel (1989), Monteiro (1997), Borges (1997), Colmanetti (2000), Ritter et al (2002), Prim (2003), Hamada (2004), Leite (2004), Iwai (2005).

Ritter et al (2002) realizaram ainda ensaios de permeabilidade moldados na umidade ótima do solo utilizando como líquido percolante a água e o líquido percolado de

aterros sanitários. Com seu estudo obteve valores de permeabilidades menores com o líquido percolado, fato explicado pela colmatação da amostra pelas partículas sólidas em suspensão presentes no líquido.

Hamada (2004) estudou o transporte de líquidos e a atenuação da carga orgânica do chorume de aterro sanitário em um solo arenoso fino, compactado com diferentes graus de compactação (75, 80, 85, 90 e 95 % do Proctor Normal), alimentados com água e com líquido percolado. Verificaram-se reduções sensíveis na permeabilidade do líquido percolado e na remoção da DQO para as colunas submetidas a graus de compactação iguais ou superiores a 85%.

As interações solo-chorume e as reações físico-químicas envolvidas durante a percolação resultam na atenuação da carga de contaminantes do chorume. Esse processo tem como consequência a redução da concentração de contaminantes durante o respectivo transporte através do solo. As principais formas de atenuação são: física (filtração, difusão e dispersão, diluição e absorção); química (precipitação/dissolução, adsorção/desorção, complexação, troca iônica e reações de redox); e microbiológica (biodegradação aeróbia e anaeróbia) (HAMADA, 2004).

Por outro lado, os solos compactados com graus de 85 e 90%, apresentaram entre si comportamentos semelhantes, com redução crescente do fluxo para valores inferiores a 100 ml mensais. Tal fato demonstra suscetibilidade à colmatação do solo compactado estudado com graus maiores ou iguais a 85%, promovida pelas partículas em suspensão e pelo desenvolvimento provável de flocos e películas biológicas.

Conclui-se, também, que as características ácidas do solo são fundamentais para remoção da elevada alcalinidade do chorume em questão, que ocorre naturalmente, pela neutralização das bases químicas existentes (HAMADA, 2004).

Iwai (2005), a partir dos resultados do seu estudo sobre remoção da DQO do chorume através da percolação em solos empregados como material de cobertura de aterros sanitários obteve remoções de DQO acima de 90%, remoção média de aproximadamente 60% de sólidos totais, o que acarretou em resultados

significativos de redução de cor e turbidez. Verificou-se que a compactação do solo tem influência direta nos resultados, uma vez que em solos com densidade maior a velocidade de escoamento é mais baixa, obtendo-se melhores resultados em termos de eficiência. Por outro lado, a colmatação é mais rápida, prejudicando a percolação do efluente e comprometendo o sistema. Conclui-se, portanto, que o principal mecanismo de remoção neste sistema, é a ação física do solo na retenção de material particulado, respondendo assim por grande parcela da eficiência observada.

### 3.4.3 Metais no solo

Segundo Shuman (1991), os metais podem ser encontrados no solo nas seguintes formas:

- dissolvidos na solução de solo;
- ocupando posições de trocas em inorgânicos constituintes do solo;
- quimiossorvidos em inorgânicos constituintes do solo;
- associados com a matéria orgânica;
- puramente precipitados ou misturados com sólidos;
- presentes na estrutura de minerais secundários;
- presentes na estrutura de minerais primários.

Os metais pesados são os que apresentam maior risco ao meio ambiente. Estes metais possuem peso específico maior do que  $6 \text{ g/cm}^3$  ou número atômico maior que 20. Os metais mais tóxicos são o Mercúrio (Hg), Cádmiio (Cd), Cobre (Cu), Chumbo (Pb), Cobalto (Co) e Níquel (Ni).

Lange et al (2002) estudaram o transporte de contaminantes (metais pesados) em solos do Aterro de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos do Município de Catas Altas, MG. Observou-se, com esta pesquisa, um significativo potencial de retenção de metais pesados no solo, especialmente para o cromo.

Rodrigues & Taioli (2003) verificaram a alteração da qualidade do solo que serve como base para a disposição e cobertura de resíduos gerados no município de Ilhabela – SP. Através da comparação dos solos impactados do lixão e testes

laboratoriais de adsorção realizados em solos não impactados, os autores analisaram a adsorção dos metais pesados no solo (Pb, Ni, Zn, Ba, Mn).

Com esta pesquisa, observou-se que a partir do sétimo dia de contato entre o solo e o líquido percolado, os valores das concentrações de metais adsorvidos tenderam a se estabilizar. As amostras de solo que tiveram contato com o líquido percolado apresentaram enriquecimento pelos íons Pb, Ni e Zn, entretanto, apresentaram concentrações de Ba e Mn inferiores às encontrados no solo de referência.

Em seu estudo, Ezaki & Hypolito (2005) avaliaram a disponibilidade de íons de metais pesados associados a solos de dois aterros sanitários da região metropolitana de São Paulo. No Aterro I coletaram amostras de solo na base, no meio e no topo do aterro. No Aterro II coletaram amostras superficiais onde houve escape de chumbo nos taludes.

O solo do Aterro I apresentou textura argilosa a franco argilosa. Na mineralogia do solo, predominam caulinita, mica (muscovita e/ou ilita), quartzo e gibbsita e, acessoriamente, ocorrem óxi-hidróxidos de ferro. Apresentou baixa capacidade de associação de íons de metais à superfície de seus constituintes e baixo valor de capacidade de troca catiônica ( $13,7 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ).

O solo do Aterro II enquadrou-se nas classes franco argilo-arenosa e franco-arenosa. Foram identificados caulinita, mica (muscovita e/ou ilita), quartzo e vermiculita. A CTC é baixa, mas cerca de três vezes maior ( $38,8 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ) que no Aterro I.

Os solos impactados coletados nos aterros, quando comparados aos solos tomados como referência, mostraram enriquecimento por metais pesados devido a fenômenos de adsorção e/ou precipitação, resultado do contato chumbo/solo/lixo.

Dentre os cátions em porcentagens maiores constataram-se, elevados teores de manganês, cálcio e magnésio, enquanto potássio, cálcio e alumínio foram os mais lixiviados. O cobre foi intensamente adsorvido às partículas dos solos de células mais recentes, enquanto elevados teores de chumbo foram averiguados somente

nas amostras de célula mediana no aterro. Todas as amostras demonstraram contaminação por níquel e cobalto.

A Tabela 3.4 apresenta os valores de metais recomendados pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), através do Relatório de estabelecimento de valores orientados para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo, 2001.

**Tabela 3.4 – Valores orientados para solos (mg.kg<sup>-1</sup>)**

<b>Substância</b>	<b>Valor de referência</b>	<b>Valor de alerta</b>
Cádmio (Cd)	< 0,5	3
Chumbo (Pb)	17	100
Cobalto (Co)	13	25
Cobre (Cu)	35	60
Cromo (Cr)	40	75
Magnésio (Mg)	-	-
Manganês (Mn)	-	-
Níquel (Ni)	13	30
Zinco (Zn)	60	300

Fonte: CETESB (2001)

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização desta pesquisa foram definidas as seguintes etapas, representadas na Fig. 4.1:

**1ª etapa:** escolha dos aterros sanitários e caracterização dos solos;

**2ª etapa:** montagem do piloto experimental de fluxo, ou seja, um conjunto de permeâmetros com os solos em estudo variando o grau de compactação;

**3ª etapa:** monitoramento do piloto experimental com controle de temperatura durante seis meses. Controle da permeabilidade dos solos e realização de análises físico-químicas do líquido percolado semanalmente.

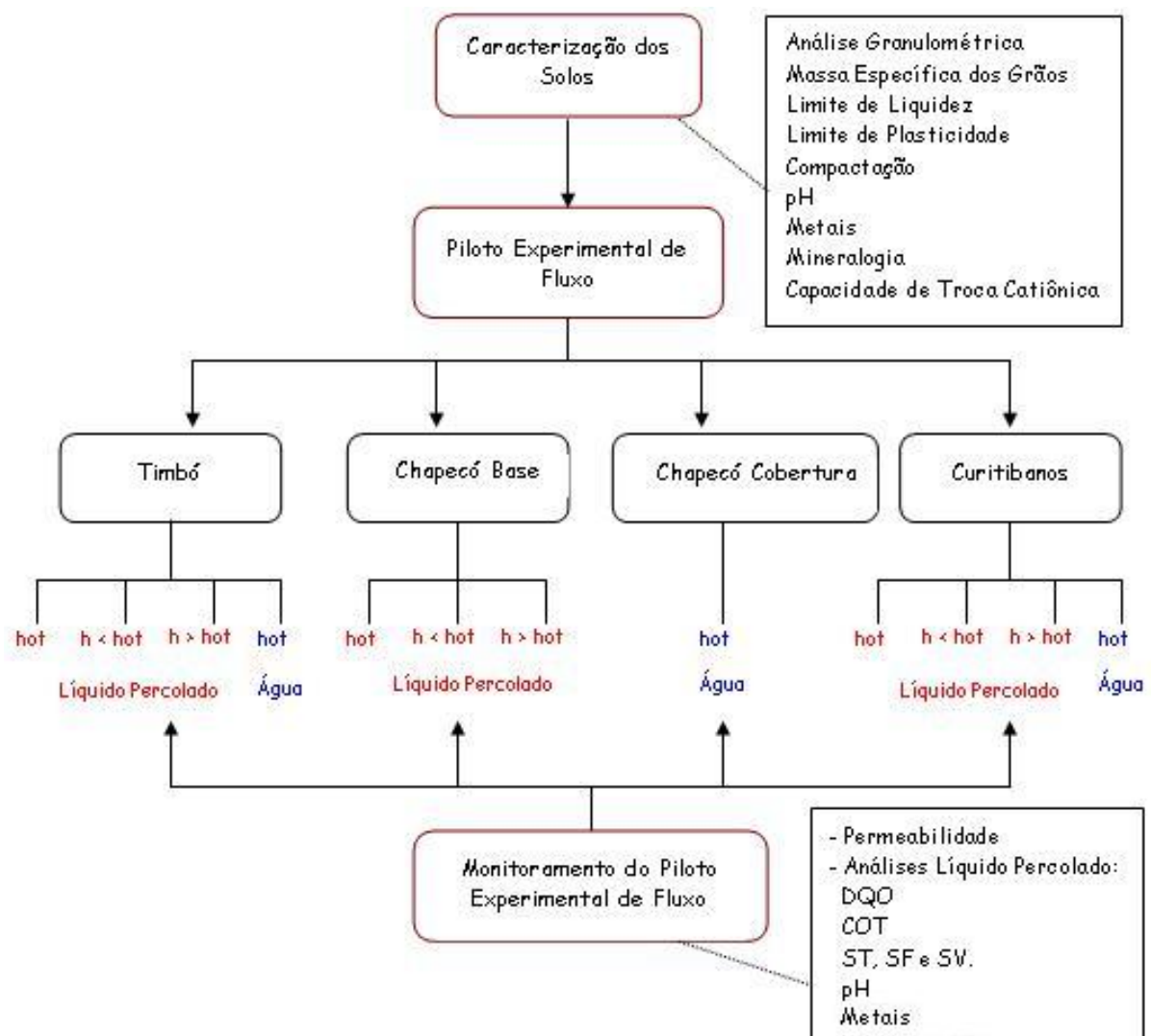


Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia

Neste capítulo estão detalhados os procedimentos analíticos da caracterização do solo, do líquido percolado e demais critérios adotados. Os ensaios e análises foram realizados em vários laboratórios da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC (Laboratório de Mecânica dos Solos, Laboratório de Resíduos Sólidos e Laboratório Integrado do Meio Ambiente), Laboratório de Difractometria de Raios X da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS e o Laboratório Físico Químico e Biológico da Companhia Integrada de Desenvolvimento Agrícola de Santa Catarina - CIDASC.

#### 4.1 Amostras dos Solos

Os solos utilizados para a realização desta pesquisa foram coletados em três aterros sanitários de Santa Catarina: Timbó, Chapecó e Curitibanos; localizados em regiões geográficas diferentes, conforme mostra a Fig. 4.2.

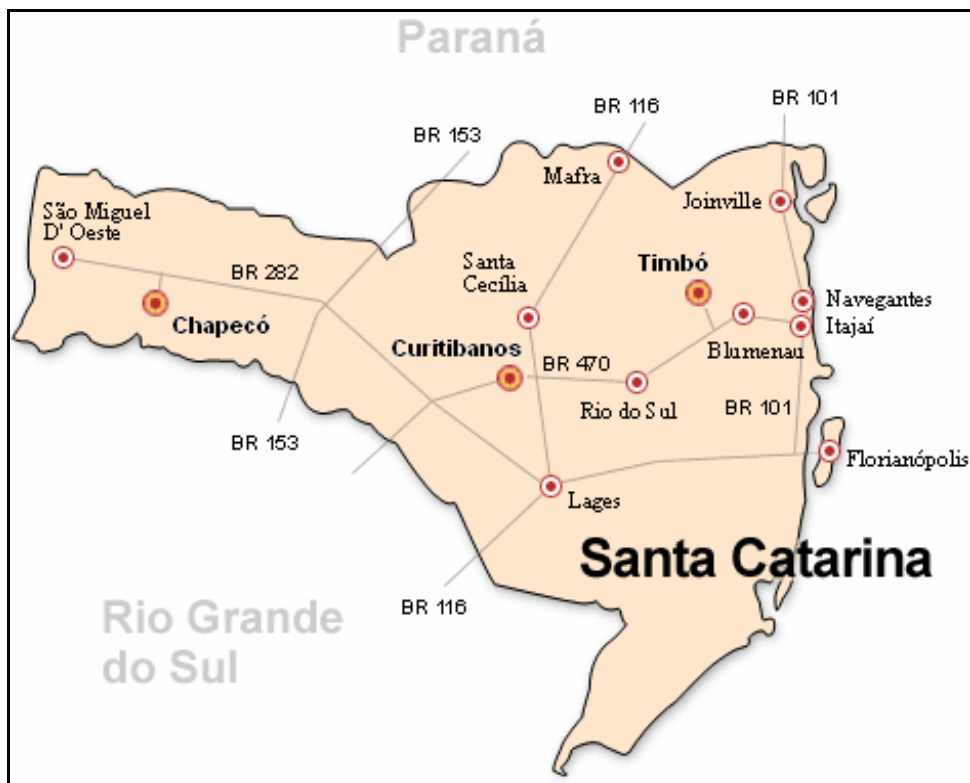


Figura 4.2 – Localização dos aterros sanitários  
Fonte: Adaptado de MAPA de Timbó (2005).



### a) Aterro Sanitário de Timbó

O solo coletado neste aterro é utilizado tanto para a camada de base como de cobertura, sendo denominado de **AM1** (Fig. 4.3). A coleta foi realizada no dia 30/07/2004.

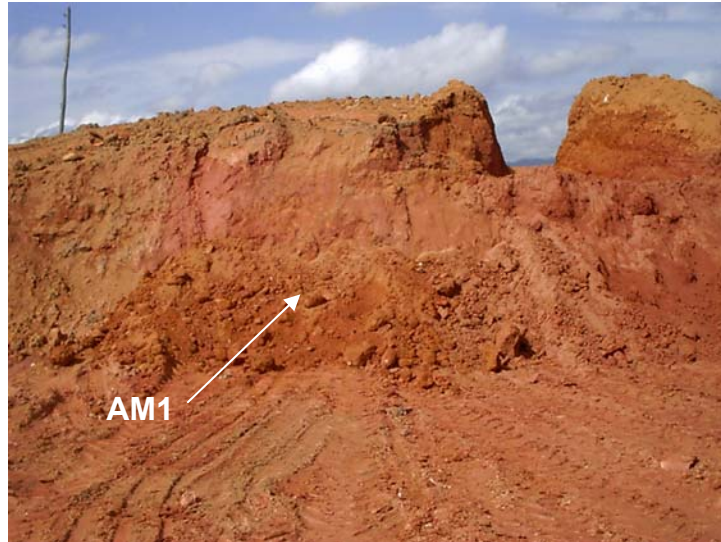


Figura 4.3 – Jazida de solo

### b) Aterro Sanitário de Chapecó

Este aterro utiliza dois tipos de solos: um para a base e outro para a cobertura. A coleta foi realizada no dia 11/03/05. Na Fig. 4.4 observa-se o solo utilizado para a camada de base e laterais, sendo denominado AM2. Na Figura 4.5 observa-se a amostra AM3, utilizada para cobertura diária e final das células. Este solo apresentou grande quantidade de raízes e pedras.



Figura 4.4 – Solo utilizado para base



Figura 4.5 – Solo para cobertura

### c) Aterro Sanitário de Curitibaanos

A amostra de solo (**AM4**) foi coletada no dia 12/03/05, sendo utilizada para as camadas de base e cobertura do aterro (Fig. 4.6).



Figura 4.6 – Coleta do solo

A partir dos três aterros sanitários em estudo, foram coletadas quatro amostras de solo, conforme mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resumo dos solos

Aterro Sanitário	Camada de Solo	Nome
Timbó	Base/Cobertura	AM1
Chapecó	Base	AM2
	Cobertura	AM3
Curitibaanos	Base/Cobertura	AM4

#### 4.1.1 Ensaio físicos

A caracterização dos solos foi realizada no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da UFSC. As amostras foram preparadas conforme as recomendações da NBR 6457/1986 – Amostras de Solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

Na Tabela 4.2 estão apresentados os ensaios realizados conforme as recomendações das normas da ABNT.

Tabela 4.2 – Ensaios físicos

Ensaio	Norma da ABNT
Análise Granulométrica	NBR 7181 de 1984 – Solo: Análise Granulométrica
Massa Específica dos Grãos	NBR 6508 de 1984 – Grãos de Solos que passam na peneira de 4,8 mm: determinação da massa específica
Limite de Liquidez (LL)	NBR 6459 de 1984 – Solo: Determinação do limite de liquidez
Limite de Plasticidade (LP)	NBR 7180 de 1984 – Solo: Determinação do limite de plasticidade
Compactação	NBR 7182/86 – Solo: Ensaio de compactação; sendo realizado com reuso do material

O Índice de Plasticidade (IP) é calculado como a diferença entre o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP). Segundo Caputo (1988), os solos podem ser classificados em:

- fracamente plásticos:  $1 < IP < 7$ ;
- medianamente plásticos:  $7 < IP < 15$ ;
- altamente plásticos:  $IP > 15$ .

#### 4.1.2 Análises Químicas

As análises químicas dos solos foram realizadas antes e após a percolação com o líquido percolado. Parâmetros analisados conforme Tedesco (1995): pH, matéria orgânica, CTC e metais (fósforo, potássio, sódio, cálcio e magnésio).

#### 4.1.3 Análises Micro-estruturais

Para determinar as propriedades mineralógicas dos solos foram utilizadas as metodologias de difração ao raio X antes e após a contaminação com o líquido percolado a fim de verificar possíveis alterações na estrutura dos minerais. O ensaio foi realizado no Laboratório de Difractometria de Raios X da UFRGS, de acordo com Formoso (1984).

A análise de difração de raio X tem como função a determinação mineralógica qualitativa do material de modo rápido e eficiente. O ensaio consiste em gerar um feixe de raios X fazendo-o atingir a amostra. O feixe assim obtido é detectado e de acordo com a intensidade são registrados graficamente. A identificação das

substâncias cristalinas se dá através de um software conectado ao aparelho. Os gráficos são comparados com a carta padrão do programa e assim, pode-se fazer a identificação das substâncias presentes (OLIVEIRA, 2003).

#### 4.2 Amostras de Líquido Percolado

A NBR 14545 (2000) recomenda que o líquido a ser utilizado para os ensaios de permeabilidade seja o mesmo que percola pelo material em campo. Neste caso, para os solos de cobertura será utilizada água da torneira para simular a infiltração da água da chuva na célula do aterro. Para os solos da base será utilizado o líquido percolado do Aterro Sanitário Municipal de Biguaçu.

O líquido percolado foi coletado no dia 17 de agosto de 2005, sendo um período de seca, porém alguns dias antes da coleta ocorreram dias chuvosos. A coleta foi realizada na entrada do sistema de tratamento do líquido percolado. Para a realização dos experimentos, o líquido percolado foi filtrado em uma membrana de geotêxtil não-tecido para a retirada de folhas e insetos existentes.

O líquido percolado da entrada (S0) foi coletado para as análises físico-químicas através de um ponto de coleta (torneira) na entrada do sistema, conforme mostra a Fig. 4.7. O líquido percolado da saída do sistema foi coletado em frascos plásticos em cada permeâmetro e semanalmente foram levados ao laboratório para a realização das análises (Fig. 4.8).



Figura 4.7 – Ponto de coleta



Figura 4.8 - Coleta do líquido na saída

As análises com o líquido percolado foram realizadas semanalmente na entrada e na saída do sistema. Na Tabela 4.3 estão descritas as análises realizadas e o método utilizado.

**Tabela 4.3 – Análises com o líquido percolado**

<b>Análises</b>	<b>Método de Análise</b>
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	Colorimétrico - Método 508 do Standard Methods, 1985.
Carbono Orgânico Total (COT)	NPOC
Sólidos Suspensos Totais, Fixos e Voláteis	L5.149 da CETESB
pH	Potenciométrico
Metais: Fe, Ni, Zn, Mg, Mn, Cd, Cu, Ca, Pb e Cr	Absorção Atômica

A coleta, armazenamento e preservação das amostras foram realizadas segundo as recomendações do Guia de Coleta e Preservação de Amostras de Água da CETESB (1987).

#### **4.3 Piloto Experimental de fluxo**

O piloto experimental de fluxo é composto por doze (12) permeâmetros projetados conforme a NBR 14545 de 2000, localizados no espaço físico do Laboratório de Pesquisas em Resíduos Sólidos – UFSC. O esquema do permeâmetro pode ser visualizado na Fig. 4.9, sendo composto pela base, tampa e corpo de prova.

Os permeâmetros foram confeccionados com tubulação de eletroduto, com diâmetro de 10,3 cm e altura 18,0 cm. Essas dimensões foram assim escolhidas devido à existência de um compactador com esse diâmetro no laboratório, buscando aproveitá-lo, e também devido à disponibilidade do tubo com o mesmo diâmetro no mercado. A base e a tampa do permeâmetro foram confeccionadas com tarugo de náilon, com diâmetro de 14,0 cm. O corpo de prova possui as seguintes dimensões: 10,3 cm de diâmetro e 11,0 cm de altura. Entre o solo e o pedrisco utilizou-se um geotêxtil não tecido para reter as partículas sólidas em suspensão.

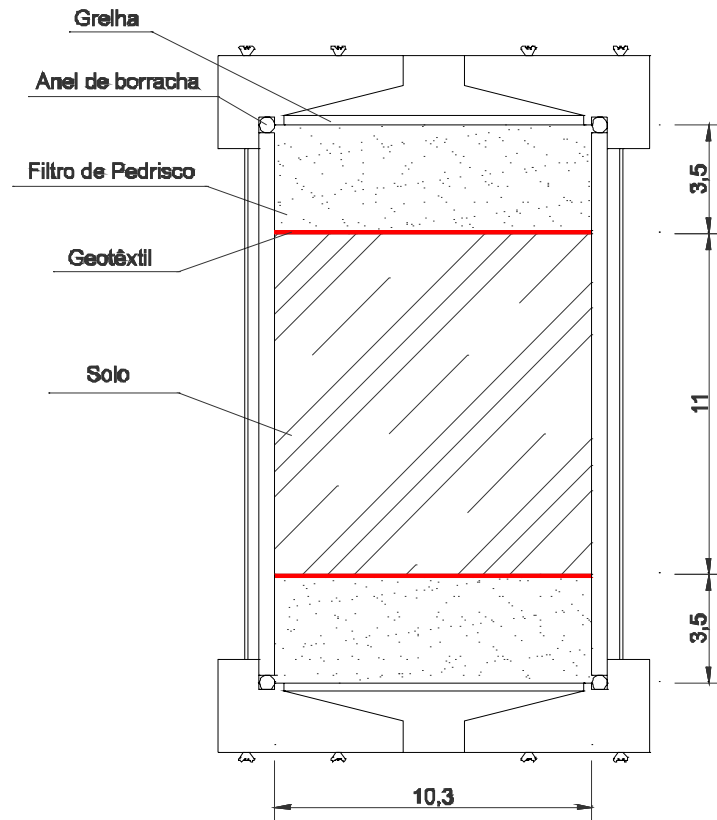


Figura 4.9 – Esquema do permeâmetro  
(Unidades em cm)

#### 4.3.1 Método de Compactação

As amostras foram compactadas diretamente no tubo do permeâmetro, com auxílio de um compactador, aplicando-se uma energia suficiente para atingir o mesmo grau de compactação para o solo compactado no ensaio Proctor Normal. Como a metodologia de compactação utilizada foi diferente da normalizada para o Proctor Normal, o ensaio foi realizado com número de golpes suficientes para se atingir o grau de compactação desejado para cada amostra. A compactação foi dividida em quatro camadas sendo aplicados sucessivos golpes até atingir uma espessura equivalente ao grau de compactação desejado. A quantidade de solo utilizada em cada camada em peso era aquela necessária para se atingir a densidade desejada, considerando o volume de cada camada. A conferência da espessura das camadas foi verificada com auxílio de um gabarito de madeira. Desta maneira foi possível atingir as densidades desejadas com a utilização de um equipamento diferente do convencional.

Os corpos de prova, para cada tipo de solo, foram compactados na umidade ótima, no ramo seco e no ramo úmido da curva de compactação. Adotou-se um grau de compactação igual a 95% para obter os pontos no ramo seco e úmido da curva de cada solo, sendo que no campo este valor normalmente varia de 95 a 100 %.

Na Fig. 4.10 verifica-se a aplicação dos golpes durante a compactação do corpo de prova. Quando a espessura era atingida, colocava-se nova quantidade de solo e aplicavam-se mais golpes (Fig. 4.11).

Sobre a amostra de solo compactada (Fig. 4.12), utilizou-se um filtro com geotêxtil para reter partículas sólidas em suspensão e uma camada de pedrisco para melhor distribuição do líquido pela superfície do solo.



Figura 4.10 – Aplicação do golpe



Figura 4.11 – Primeira camada



Figura 4.12 – Solo compactado

A tampa e/ou base do permeâmetro contém um anel de vedação e uma grelha (para evitar entrada dos pedriscos na tubulação). O permeâmetro foi fechado com auxílio de parafusos para permitir a perfeita vedação do sistema.

### 4.3.2 Ensaio de Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade foi realizado através do ensaio de carga variável em amostra compactada em permeômetros de parede rígida, conforme a NBR 14545 de 2000. Este ensaio é composto por duas etapas: saturação e ensaio de permeabilidade.

A saturação do corpo de prova deve ser realizada para a retirada do ar dos vazios existentes no solo. O fluxo, segundo recomendações da norma, deve ser ascendente, permitindo a saída do ar, conforme o esquema apresentado na Fig. 4.13. Após a saturação muda-se o sentido de fluxo e realiza-se o ensaio da permeabilidade, conforme a representação na Fig. 4.14.

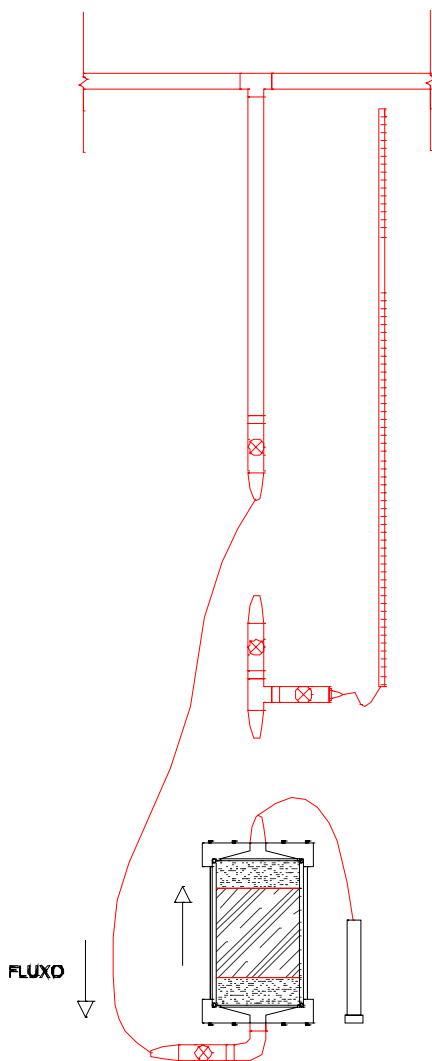


Figura 4.13 – Esquema da saturação

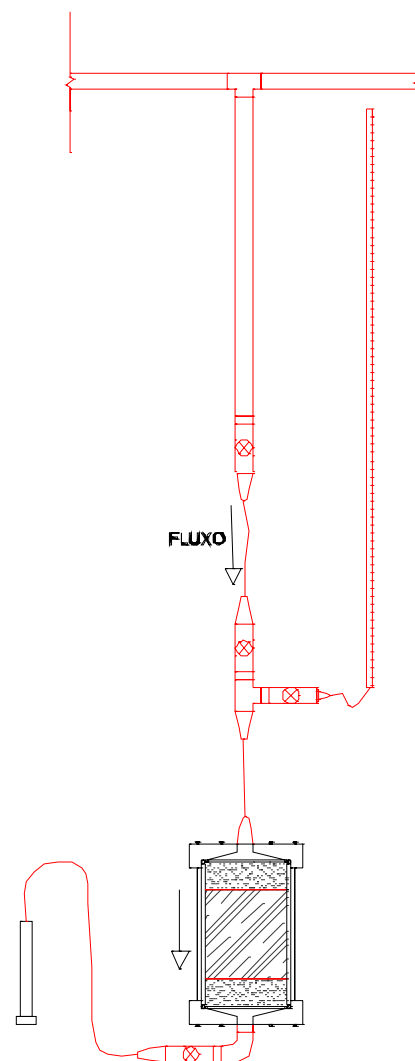


Figura 4.14 – Esquema do ensaio



O início da saturação do corpo de prova com água está apresentado na Fig. 4.15. Deixa-se a amostra saturando por certo tempo para garantir que todo ar existente seja eliminado (Fig. 4.16).



Figura 4.15 - Início da saturação



Figura 4.16 - Saturação

O piloto experimental de fluxo, composto pelos permeâmetros, está apresentado na Fig. 4.17. Observa-se o fluxo descendente do líquido percolado, processo monitorado por 180 dias.

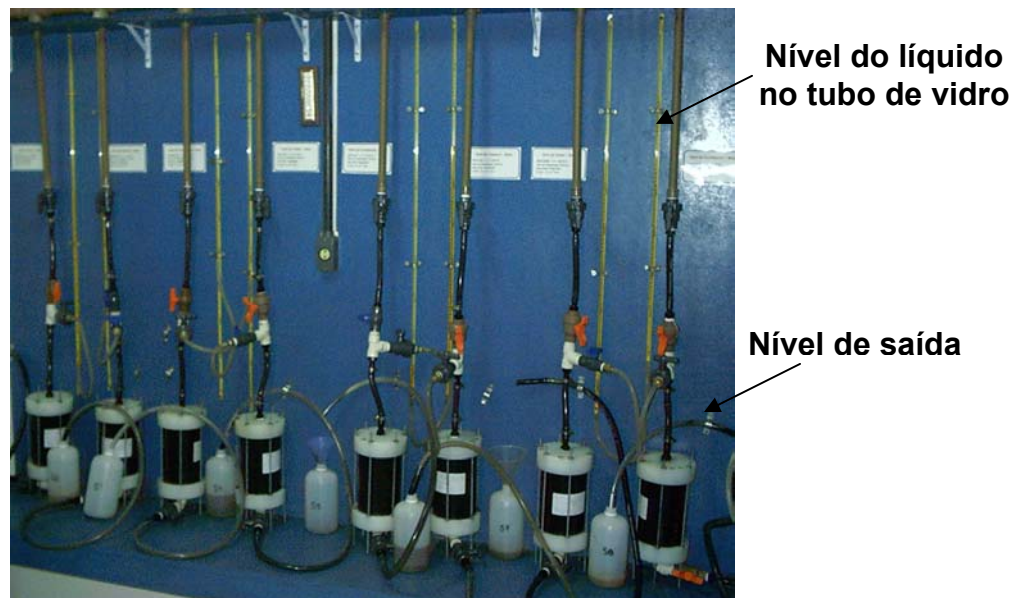


Figura 4.17 – Piloto experimental de fluxo

O líquido percolado foi armazenado em um reservatório superior, situado na parte externa do laboratório, com uma carga hidráulica de 2,00 m. O fluxo foi contínuo sobre o solo, sendo que uma vez por semana media-se o coeficiente de permeabilidade, através de um tubo de vidro com diâmetro interno de 3,90 mm e

comprimento de 1,00 m. Devido a esta diferença de carga hidráulica entre o reservatório e o tubo de vidro, para evitar variação do nível do líquido durante a leitura, um dia antes do ensaio o registro do reservatório era fechado e deixava-se o líquido percolar pelo tubo. No dia do ensaio completava-se o tubo com o líquido e iniciava-se o ensaio, marcando o tempo inicial, a leitura inicial, o nível de saída e a temperatura.

O coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) foi calculado conforme a Equação 4.1.

$$k = 2,3 \frac{a \times H}{A \times \Delta t} \log \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad (4.1)$$

onde:

$k$  = coeficiente de permeabilidade, expresso de forma exponencial com dois algarismos significativos (cm/s);

$a$  = área interna do tubo de vidro (cm<sup>2</sup>);

$H$  = altura inicial do corpo-de-prova (cm);

$A$  = área do corpo-de-prova (cm<sup>2</sup>);

$\Delta t$  = 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).

Segundo a NBR 14545 de 2000, o coeficiente de permeabilidade calculado deve ser referido à temperatura de 20° C, através de uma relação entre a viscosidade do ensaio e a viscosidade a 20° C.

Como o valor do coeficiente de permeabilidade depende da viscosidade e peso específico do líquido, e estes variam com a temperatura, optou-se, então, por controlar a temperatura do ensaio. Este controle se deu através de um aparelho de ar-condicionado, regulado na temperatura de 20° C. Esta temperatura foi escolhida por já ser o valor padrão na norma do ensaio da permeabilidade e por estar mais próxima dos valores encontrados no período de monitoramento (agosto a fevereiro).

No dia do ensaio de permeabilidade, que ocorria uma vez por semana, a temperatura do líquido era verificada com um termômetro, anotando-se seu valor na planilha para possíveis correções.

#### 4.4 Monitoramento do Piloto Experimental de Fluxo

O monitoramento do piloto experimental de fluxo foi realizado por um período de 180 dias, buscando-se entender os fenômenos que ocorrem na interação solo-líquido percolado em um período maior que os ensaios de permeabilidade normalmente realizados.

Após os 180 dias do monitoramento da permeabilidade nos solos em estudo, os permeômetros foram abertos e realizaram-se as análises químicas do solo. O processo de abertura das amostras foi semelhante para todos os permeômetros. O corpo de prova foi retirado com o auxílio do desmoldador, conforme mostra a Fig. 4.18.



Figura 4.18 - Desmoldagem

Como a camada superior do corpo de prova apresentou uma película preta de líquido percolado, esta camada foi descartada (aproximadamente 0,5 cm), pois estaria representando uma condição diferente do campo, sendo que o líquido ainda não percorreu o solo (Fig. 4.19). O corpo de prova foi aberto ao meio e a amostra foi destorroada (Fig. 4.20 e 4.21). Após a homogeneização da amostra, esta foi separada em partes iguais para a análise mineralógica e química do solo.



Figura 4.19 – Película



Figura 4.20 – Abertura do CP



Figura 4.21 – Destorroamento

## 5 RESULTADOS DA AM1

Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização do solo, no monitoramento da permeabilidade (período de 6 meses) e nas análises com o líquido percolado para a amostra AM1 (Aterro Sanitário de Timbó). As análises estatísticas dos dados foram realizadas com o auxílio do *Software Statistica 6.0*.

### 5.1 Caracterização do solo

O solo da AM1, utilizado para a camada de base e cobertura é classificado como um solo silte-arenoso, apresentando 47,01% de silte, 27,55% de areia e 25,43% argila. A curva granulométrica do solo está apresentada na Fig. 5.1.

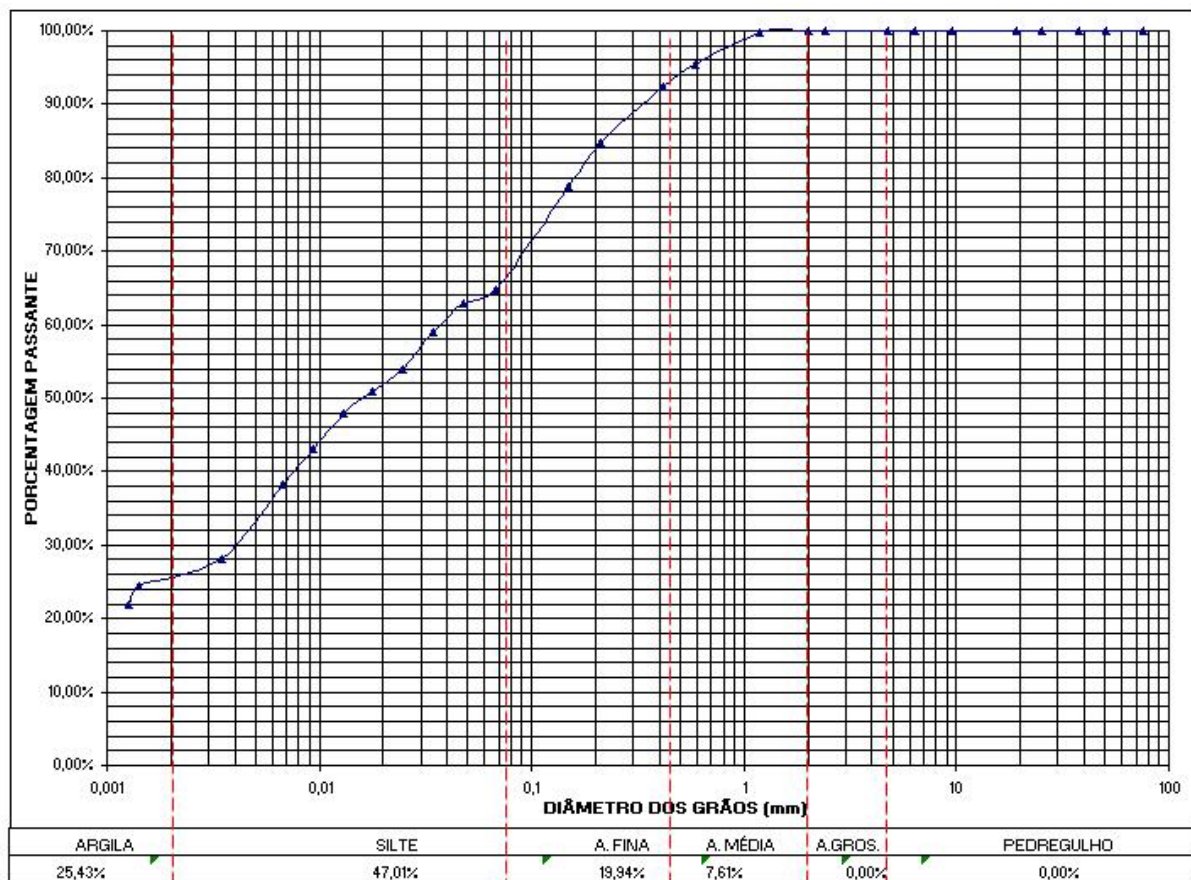


Figura 5.1 – Curva granulométrica da AM1

A massa específica dos grãos do solo é de  $2,596 \text{ g/cm}^3$ . Os limites de Atterberg determinados são:  $LL = 70 \%$  e  $LP = 64 \%$ . O índice de plasticidade (IP) é de  $6 \%$ , sendo classificado como fracamente plástico.

A umidade ótima obtida pelo ensaio de compactação foi de  $26,3 \%$  e a massa específica aparente máxima do solo seco foi de  $1,456 \text{ g/cm}^3$  (Fig. 5.2).

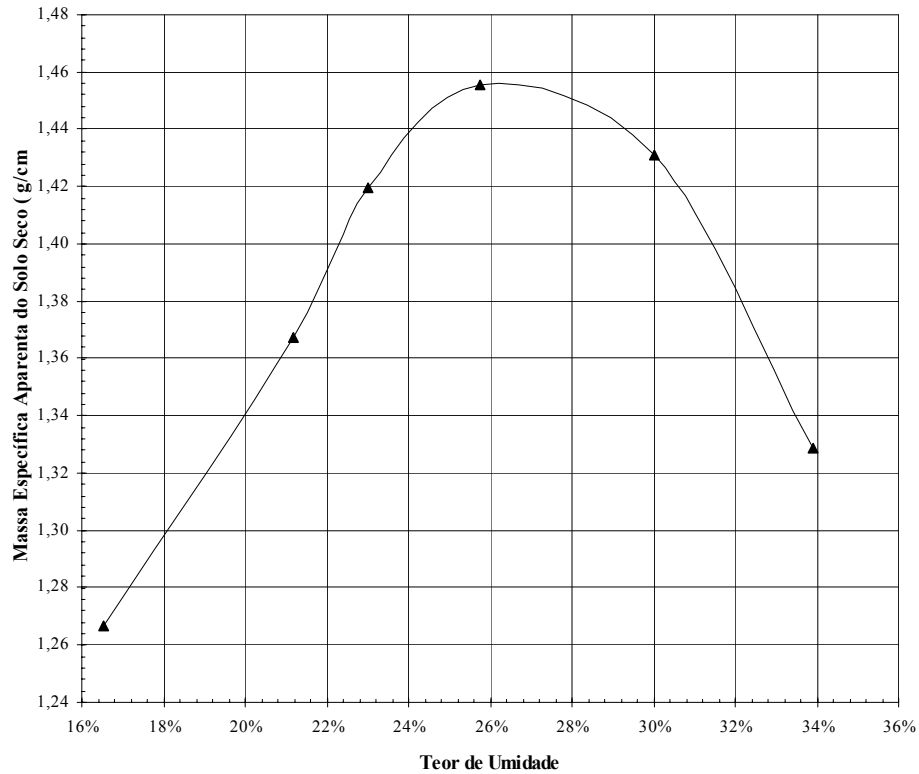


Figura 5.2 – Curva de compactação da AM1

Na Fig. 5.3 observa-se a curva de compactação obtida para as amostras na umidade ótima (S1), no ramo seco (S4), no ramo úmido (S7) e para a água (S12).

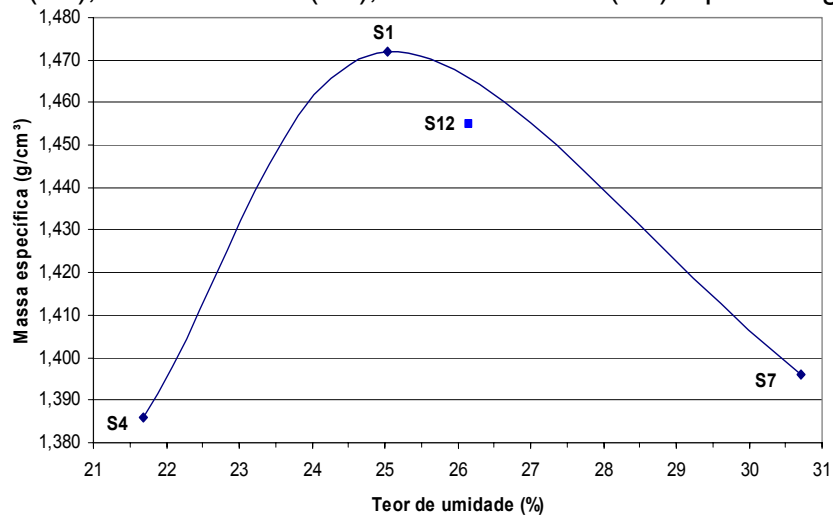


Figura 5.3 – Curva de compactação obtida

Na Tabela 5.1 apresentam-se os valores obtidos de umidade, massa específica e grau de compactação para as amostras compactadas. Destaca-se que o grau de compactação atingido não foi de exatamente 95% devido às dificuldades de compactação como a obtenção da umidade exata e da massa específica.

**Tabela 5.1 – Compactação da AM1**

<i>Amostra</i>	<i>Ramo Seco (S4)</i>	<i>h<sub>ot</sub> (S1)</i>	<i>Ramo Úmido (S7)</i>	<i>h<sub>ot</sub> água (S12)</i>
<b>Líquido</b>	Líq.Percolado	Líq.Percolado	Líq.Percolado	Água
<b>Umidade [%]</b>	21,68	25,04	30,72	26,16
<b>MEA [g/cm<sup>3</sup>]</b>	1,386	1,472	1,396	1,455
<b>Grau de Compactação [%]</b>	95,19	101,10	95,88	99,93
<b>Índice de Vazios (e)</b>	0,87	0,76	0,86	0,78
<b>Porosidade (n) [%]</b>	46,61	43,30	46,22	43,95

## 5.2 Ensaio de permeabilidade

O ensaio de permeabilidade foi realizado conforme a norma NBR 14545 de 2000. O exemplo de cálculo do coeficiente de permeabilidade está apresentado nos Apêndices A e B, sendo igual para todas as amostras estudadas.

### 5.2.1 Água – Umidade Ótima

A Fig. 5.4 mostra a variação do coeficiente de permeabilidade em função do tempo (180 dias). Observa-se que a permeabilidade do solo aumentou durante o período de monitoramento, sendo inicialmente em torno de  $1 \cdot 10^{-6}$  cm/s e em 180 dias em torno de  $4,8 \cdot 10^{-6}$  cm/s. É possível que este aumento possa ter ocorrido devido ao carreamento de partículas finas ou ainda pelo aumento do grau de saturação durante o período de monitoramento.

A existência de picos no valor do coeficiente de permeabilidade nos dias 30, 58 e 86 pode ser explicada devido à precisão do ensaio, sendo que pode ter ocorrido variação da temperatura ou até algum erro na leitura do nível de água.

Este solo, por apresentar coeficiente de permeabilidade maior que  $10^{-6}$  cm/s não é recomendado para solo de cobertura, pois permitirá que a água da chuva penetre nas células do aterro com mais facilidade.

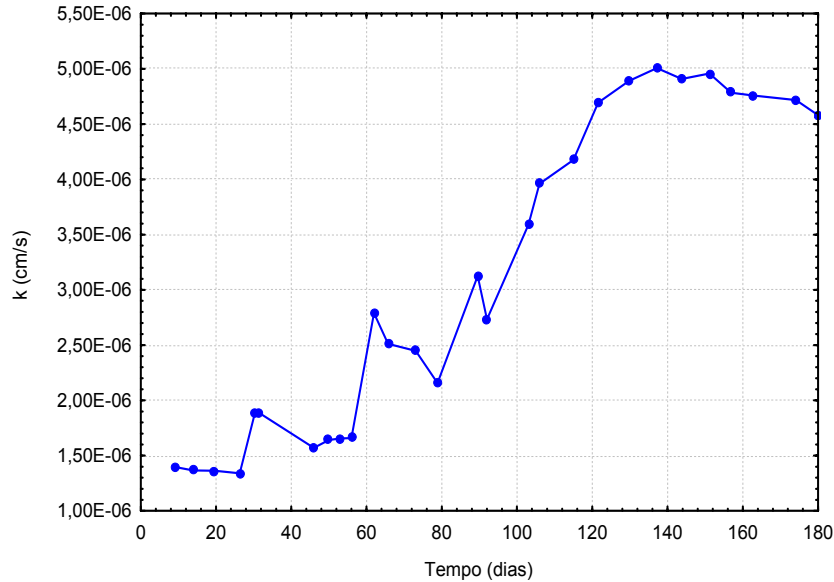


Figura 5.4 – Coeficiente de permeabilidade em função do tempo ( $h_{ot}$  água)

### 5.2.2 Líquido Percolado - Ramo Seco

Para a amostra compactada no ramo seco, observa-se que a permeabilidade do solo diminuiu durante o período de monitoramento, sendo inicialmente em torno de  $5 \cdot 10^{-7}$  cm/s e no fim do monitoramento em torno de  $2 \cdot 10^{-7}$  cm/s. Este valor não apresentou uma tendência por estabilizar, sendo que se o monitoramento continuasse poderia diminuir mais ainda (Fig. 5.5).

Acredita-se que esta redução do coeficiente de permeabilidade deva-se à colmatação dos vazios do solo por partículas em suspensão no líquido percolado.



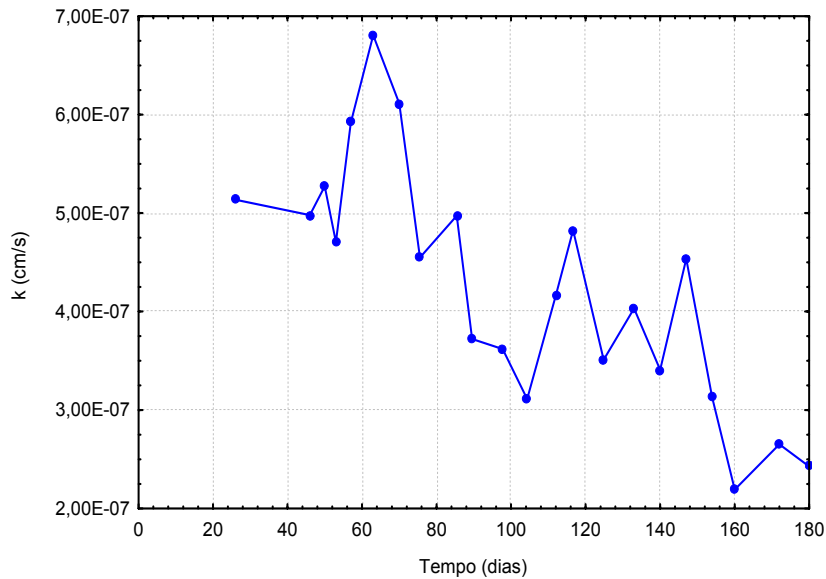


Figura 5.5 – Coeficiente de permeabilidade em função do tempo ( $h < h_{ot}$ )

### 5.2.3 Líquido Percolado - Umidade Ótima

A Fig. 5.6 mostra a variação do coeficiente de permeabilidade em função do tempo (180 dias). Observa-se uma queda no valor de permeabilidade inicialmente de  $7 \cdot 10^{-7}$  cm/s para  $2 \cdot 10^{-7}$  cm/s, o que se explica pela ocorrência de um pequeno vazamento no sistema que foi corrigido a partir do 20º dia. Após este período o coeficiente de permeabilidade apresentou uma tendência em se manter praticamente constante, sendo as dispersões justificadas pela precisão do ensaio ou ainda variações do líquido percolante.

Este solo utilizado para a camada de base é adequado a sua função de impermeabilização, por apresentar o coeficiente de permeabilidade menor que  $10^{-7}$  cm/s. É importante salientar que o solo utilizado para a base e para a cobertura é o mesmo, porém, devido à colmatação dos vazios ocorrida pelas partículas sólidas em suspensão existentes no líquido percolado, o solo apresenta menor permeabilidade do que o valor encontrado para a água, tornando-se este como adequado.

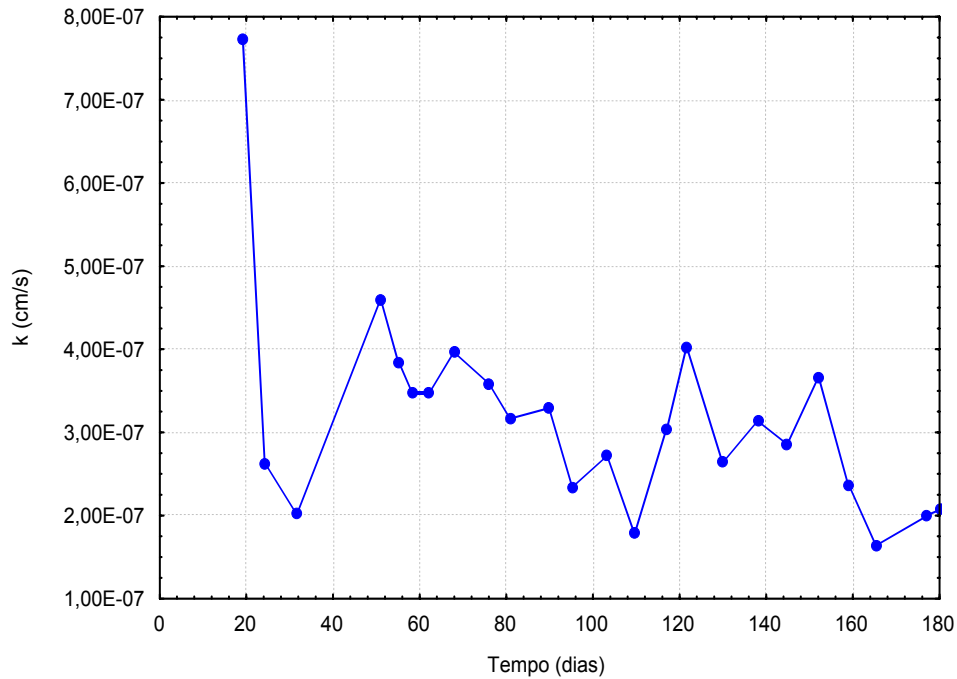


Figura 5.6 – Coeficiente de permeabilidade em função do tempo ( $h_{ot}$ )

#### 5.2.4 Líquido Percolado - Ramo Úmido

A Fig. 5.7 mostra a variação do coeficiente de permeabilidade em função do tempo. Observa-se que a permeabilidade do solo diminuiu durante o período de monitoramento, sendo inicialmente em torno de  $5.10^{-7}$  cm/s e em 180 dias em torno de  $1,50.10^{-7}$  cm/s.

Como o líquido percolado dos aterros sanitários apresenta grande quantidade de partículas sólidas em suspensão, esta redução na permeabilidade pode ser devido à colmatação dos vazios durante o período de monitoramento.

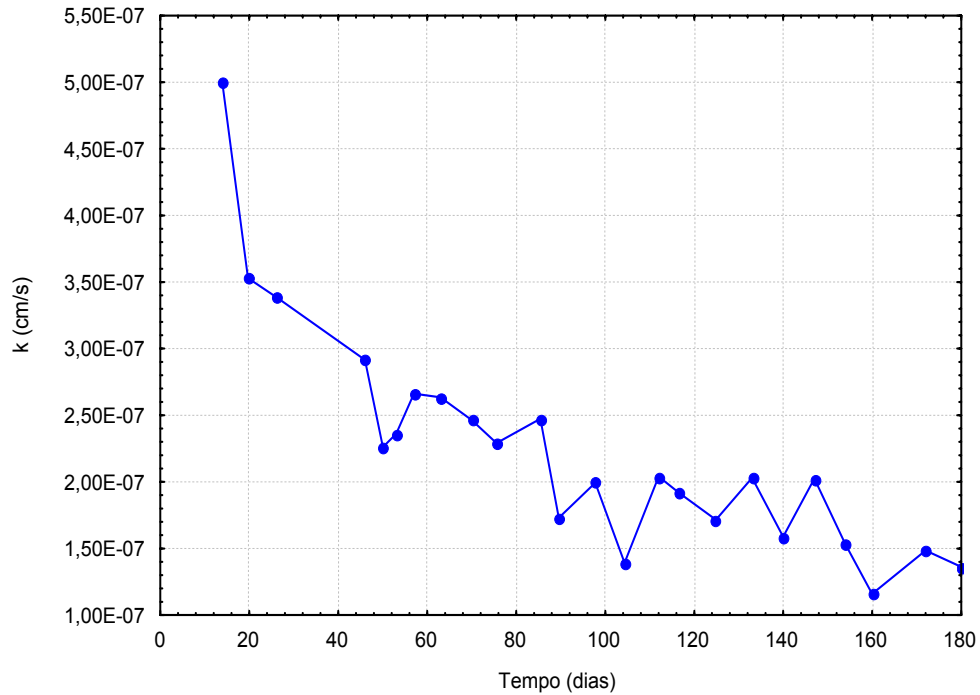


Figura 5.7 – Coeficiente de permeabilidade em função do tempo ( $h > h_{ot}$ )

## 5.2.5 Resumo

Na Tabela 5.2 observa-se o resumo dos valores dos coeficientes de permeabilidade médios encontrados para as amostras da camada de base, analisados mensalmente.

Tabela 5.2 – Resumo dos valores de permeabilidade médios

Período [dias]	$k_{méd}$ [cm/s]		
	Ramo Seco	$h_{ot}$	Ramo Úmido
<b>0 a 30</b>	$5,13 \cdot 10^{-7}$	$5,20 \cdot 10^{-7}$	$3,97 \cdot 10^{-7}$
<b>31 a 60</b>	$5,22 \cdot 10^{-7}$	$3,49 \cdot 10^{-7}$	$2,55 \cdot 10^{-7}$
<b>61 a 90</b>	$5,23 \cdot 10^{-7}$	$3,51 \cdot 10^{-7}$	$2,32 \cdot 10^{-7}$
<b>91 a 120</b>	$3,93 \cdot 10^{-7}$	$2,49 \cdot 10^{-7}$	$1,84 \cdot 10^{-7}$
<b>121 a 150</b>	$3,87 \cdot 10^{-7}$	$3,17 \cdot 10^{-7}$	$1,84 \cdot 10^{-7}$
<b>151 a 180</b>	$2,54 \cdot 10^{-7}$	$1,92 \cdot 10^{-7}$	$1,42 \cdot 10^{-7}$

Com isso, observa-se que o valor do coeficiente de permeabilidade médio foi diminuindo a cada mês, sendo que para o ramo úmido o valor tendeu a ser o menor de todos (Fig. 5.8). Isto já era esperado pelo fato da amostra no ramo úmido apresentar mais redução de vazios, dificultando a passagem do líquido.

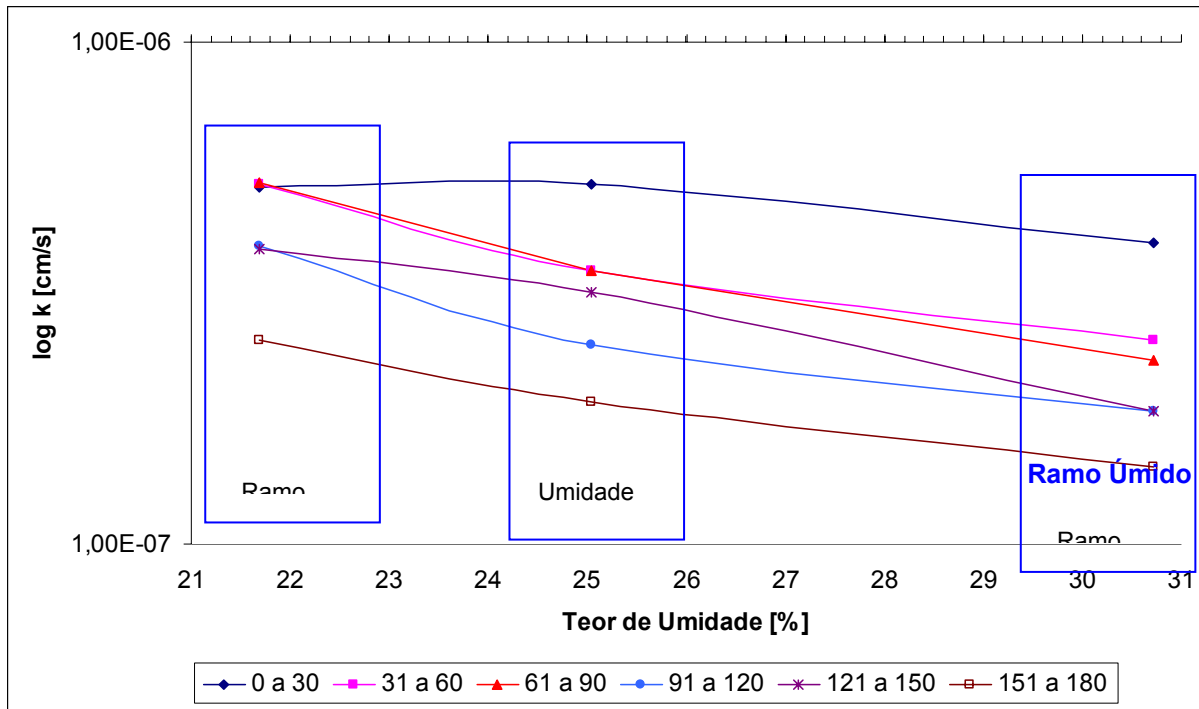


Figura 5.8 – Permeabilidade nas diferentes umidades de compactação ao longo do monitoramento

### 5.3 Análises químicas

Os resultados da análise química do solo estão apresentados na Tabela 5.3

Tabela 5.3 - Resultados da análise química do solo antes da percolação

Determinação	Amostra natural	Ramo Seco (S4)	Umidade Ótima (S1)	Ramo Úmido (S7)
pH	4,70	8,70	8,70	8,70
Matéria orgânica [%]	0,40	0,70	0,70	0,60
CTC [cmol <sub>e</sub> /l]	10,03	6,14	6,37	5,89
Fósforo [mg/l]	4,30	12,10	13,10	9,80
Potássio [mg/l]	12,00	859,00	915,00	819,00
Cálcio [cmol <sub>e</sub> /l]	1,10	1,00	1,10	0,60
Magnésio [cmol <sub>e</sub> /l]	0,20	1,00	0,90	0,70
Sódio [mg/l]	3,00	333,00	353,00	432,00

Segundo Van Raij (1991), a faixa de variação do pH dos solos é ampla (varia de 3 a 10). Sob condições muito ácidas, ocorre a solubilização do alumínio no solo. Em condições extremas, de solos com ácidos livres, orgânicos ou ácidos sulfúricos, pode ocorrer solubilização de ferro e manganês, além do alumínio. Esses três metais são tóxicos para as plantas.

O valor do pH dos solos analisados apresentou grandes alterações após o contato com o líquido percolado. Para a amostra natural o valor foi de 4,70, classificado como ácido; e após a percolação foi de 8,70, um solo básico. Essa alteração do pH em todas as amostras pode ser explicada pela passagem do líquido percolado (pH médio de 8,69), observando-se a tendência do solo possuir o mesmo valor de pH que o líquido percolado. Esta mudança de pH deve, em partes, à capacidade de troca catiônica do solo.

O teor de matéria orgânica também sofreu alterações, inicialmente de 0,40%, classificado como baixo, após o contato com o líquido passou para 0,60 e 0,70%, ainda classificado como baixo. O solo compactado no ramo úmido da curva apresentou teor de matéria orgânica mais baixo que os demais, ocorrendo menor contaminação do solo em estudo.

Conforme Van Raij (1991), a existência de matéria orgânica no solo demonstra a ação dos agentes biológicos, e com isso, passa a conter dois importantes elementos não existentes no material de origem do solo: carbono e nitrogênio. Em geral, os solos argilosos são mais ricos em matéria orgânica. Em condições de excesso de umidade, que impede a decomposição, pode haver acúmulo acentuado de água, formando-se os solos orgânicos.

A matéria orgânica agrega partículas minerais, confere ao solo condições favoráveis de porosidade e aumenta a retenção de água em solos, sendo responsável, em grande parte, pela capacidade de troca catiônica dos solos.

A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) de um solo indica a reserva de nutrientes para as plantas, a possibilidade de redução das perdas de cátions por lixiviação e a inativação de compostos tóxicos. Segundo Tedesco et al (1995), a CTC pode variar desde valores próximos de zero (para solos arenosos) até a 20-30  $\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$  (para solos férteis).

A CTC, inicialmente com valor de 10,03  $\text{cmol}_c/\text{l}$  (classificada como média), mudou para 6,14  $\text{cmol}_c/\text{l}$  no ramo seco (média), 6,37 na umidade ótima (média) e 5,89 para

o ramo úmido (média). Com essa mudança dos valores da capacidade de troca catiônica verifica-se que ocorreu troca de cátions.

O elemento fósforo, na amostra natural a concentração foi de 4,30 mg/l e após o contato com o líquido aumentou para 12,10 mg/l no ramo seco, 13,10 mg/l na umidade ótima e 9,80 mg/l no ramo úmido. Observa-se que a concentração do metal no solo aumentou com a passagem do líquido percolante, ou seja, ocorreu a retenção do fósforo no solo.

Para o potássio, a amostra natural apresentou 12,00 mg/l e após a percolação este valor passou para 859 mg/l (ramo seco), 915 mg/l ( $h_{ot}$ ), 815 mg/l (ramo úmido), observando-se uma grande alteração da concentração. Isto significa que, através do contato solo-líquido o solo reteve uma quantidade muito grande de potássio.

Quanto ao sódio, a concentração na amostra natural foi de 3,00 mg/l e após o contato com o líquido foi de 333 (ramo seco), 353 ( $h_{ot}$ ) e 432 mg/l (ramo úmido). Verifica-se também a retenção do metal no solo de forma muito significativa.

O valor do cálcio praticamente não variou, apenas no ramo úmido é que o valor reduziu pela metade do inicial, o que pode ser explicada pela possível ocorrência de lixiviação, reduzindo a concentração do metal.

A concentração do magnésio aumentou após a percolação, com valor inicial de 0,20 cmol<sub>c</sub>/l, passou para 1,00 (ramo seco), 0,90 (umidade ótima) e 0,70 (ramo úmido), ou seja, também está ocorrendo retenção do metal no solo.

#### **5.4 Análises micro-estruturais**

Os espaçamentos interplanares (valores de  $d$ ) constituem características físicas de um mineral, a exemplo da densidade, do índice de refração e do ângulo óptico. A identificação de um mineral pode ser feita por um conjunto de valores de espaços interplanares (Formoso, 1984). Na Fig. 5.9 observa-se a curva da difratometria de

raios X para a amostra natural. Observaram-se a predominância dos seguintes minerais: quartzo, caulinita, muscovita e hematita.

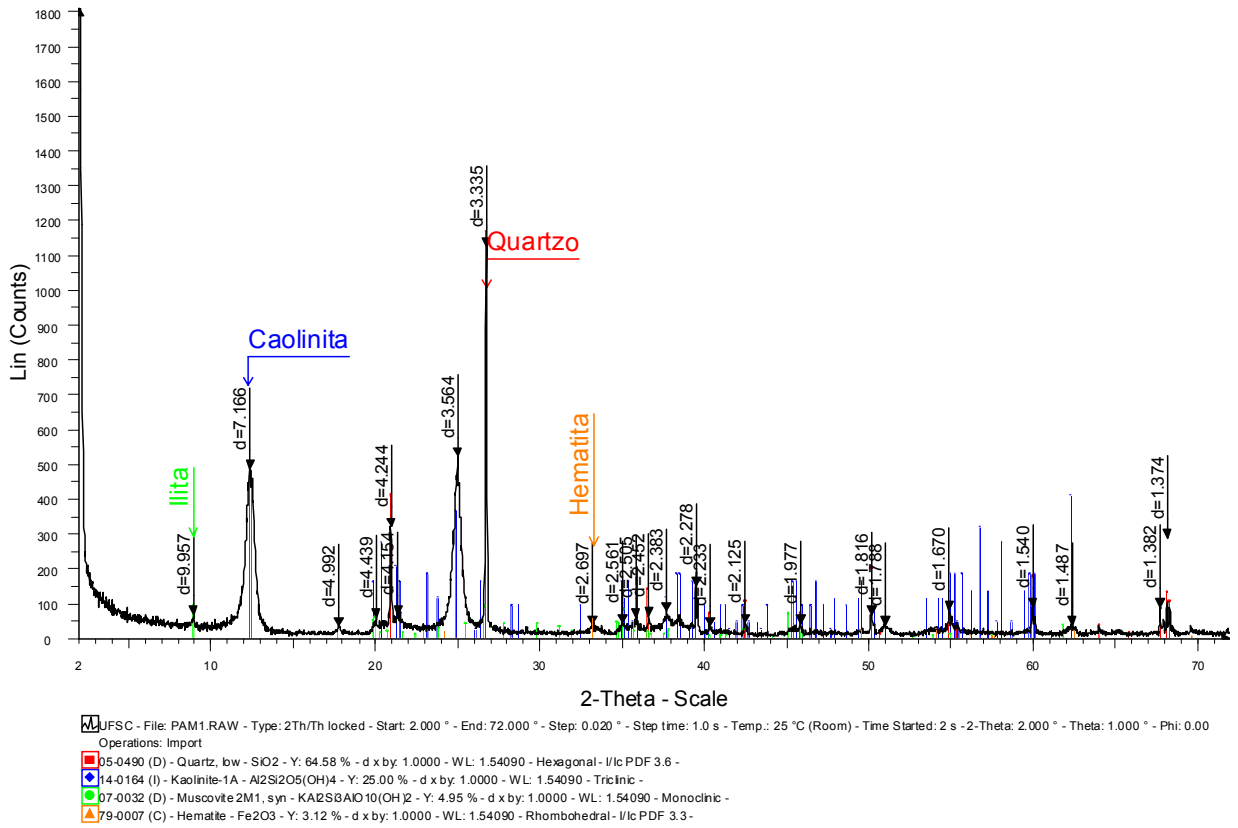


Figura 5.9 - Curva da difratometria de raios X antes da percolação

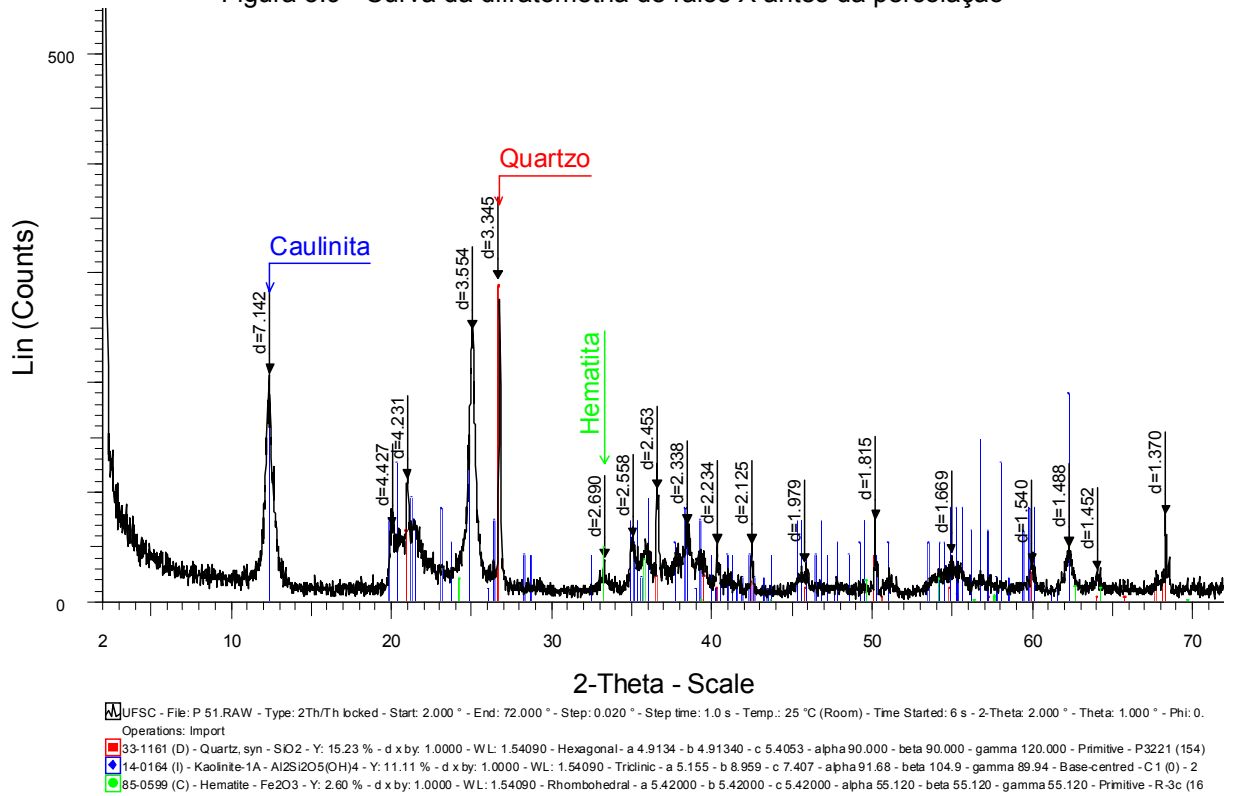


Figura 5.10 - Curva da difratometria de raios X após a percolação

Apenas as amostras compactadas na umidade ótima foram analisadas após a percolação, pois os custos do ensaio são elevados. Na Fig. 5.10 observa-se a curva da difratometria após o contato com o líquido percolado. Destacam-se a predominância dos seguintes minerais: quartzo, caulinita e hematita. Observa-se que não houve grandes alterações na mineralogia do solo após a percolação. A muscovita não apareceu na análise após a percolação, talvez isto possa ser explicado simplesmente pela falta de interpretação deste mineral.

### 5.5 Análises com o líquido percolado

Durante o período de monitoramento, as amostras analisadas foram coletadas semanalmente em cada permeâmetro monitorado, correspondendo ao grau de compactação em estudo. O líquido foi coletado na entrada (S0), na umidade ótima (S1), no ramo seco (S4) e no ramo úmido (S7) (Fig. 5.11). Observa-se que as amostras na saída apresentaram uma coloração bem mais clara do que a da entrada, o que evidencia a filtração realizada pelo solo (APÊNDICE C).



Figura 5.11 – Líquidos percolados pela AM1

#### 5.5.1 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A Tabela 5.4 apresenta os resultados encontrados nas análises da DQO para as amostras estudadas. Observa-se que o solo compactado no ramo seco da curva (S4) apresentou o menor valor da DQO média, como era esperado, fato explicado pela maior eficiência da filtração do solo neste ponto.



Tabela 5.4 – Estatística Descritiva da DQO

<b>DQO</b>	<b>S0</b>	<b>S4</b>	<b>S1</b>	<b>S7</b>
<b>N</b>	25	20	21	20
<b>Média [mg/l]</b>	1768,52	1068,76	1119,86	1190,70
<b>Mínimo [mg/l]</b>	1370,65	615,70	410,75	143,65
<b>Máximo [mg/l]</b>	3034,15	1544,75	1792,05	3149,15
<b>Desvio Padrão</b>	322,10	203,07	264,90	548,79

A DQO é um parâmetro muito utilizado para medir o teor de matéria orgânica nas amostras e equivale ao oxigênio necessário à oxidação da matéria orgânica. Observa-se que o valor médio da entrada foi de 1768 mg/l e para as saídas os valores foram menores, observando-se que parte da matéria orgânica ficou retida no solo.

Durante o período de 33° a 57° dia não foi realizada análise da DQO em nenhum permeâmetro devido a problemas técnicos no aparelho, o que é visível nos gráficos pela falta de pontos durante este intervalo de tempo (Fig. 5.12, 5.13 e 5.14).

Para o líquido percolado da entrada do sistema, o valor da DQO inicial foi de 3000 mg/l e após 15 dias de monitoramento o valor reduziu para 2000 mg/l. Visualiza-se a ocorrência de dois picos no 31° e 76° dia, nos demais dias o valor da DQO permaneceu próximo de 1600 mg/l.

Para a saída S4 ocorreu um pico no 24° dia e um valor menor no 145° dia. Os valores de DQO para o ramo seco variaram de 615 a 1544 mg/l (Fig. 5.12). Para a saída S1 visualiza-se um pico maior no 30° dia, sendo que o valor da DQO no período de monitoramento variou de 410 a 1792 mg/l. Observa-se que no dia 76, apesar do valor da DQO na entrada ter apresentado um pico, na saída este valor foi menor (Fig. 5.13).

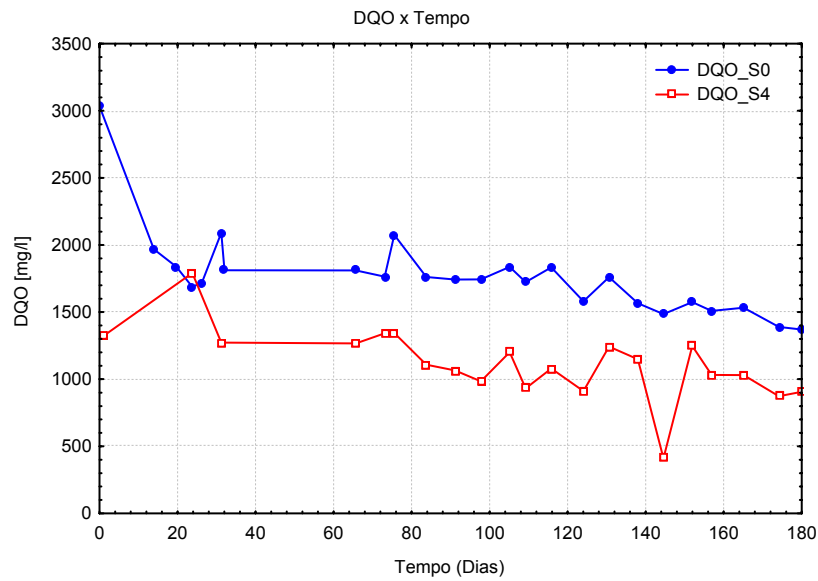


Figura 5.12 – DQO x tempo para ramo seco

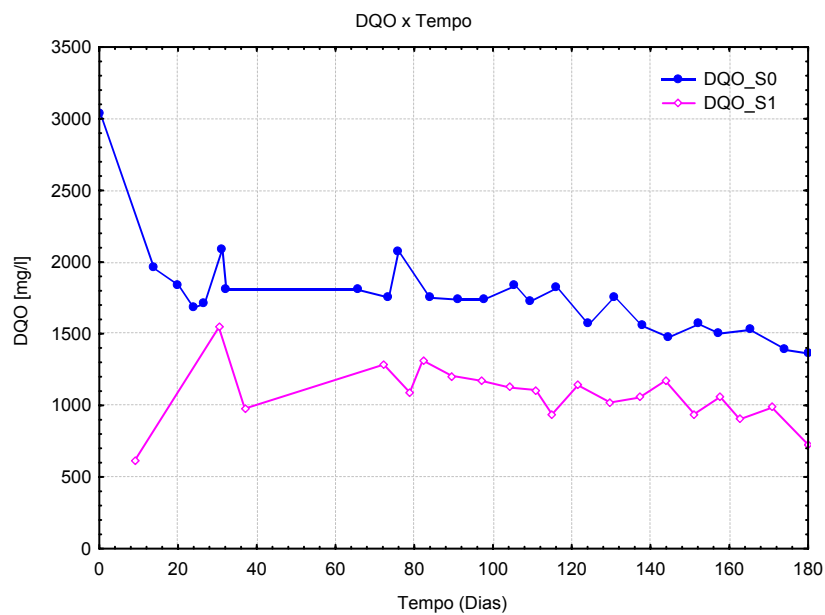


Figura 5.13 – DQO x tempo para  $h_{ot}$

Para o ramo úmido, no 139º dia ocorreu um pico muito alto no valor da DQO, sendo este valor maior que o valor da entrada. Neste dia, por falta de amostra para todas as análises, foi retirada amostra do líquido da mangueira que liga a saída do permeâmetro ao frasco de coleta da amostra. Com isso, partículas suspensas nas paredes da mangueira foram arrastadas e coletas junto com o líquido, gerando um valor de DQO bem maior. Já no 146º dia, uma semana após, o valor apresentou um pico muito pequeno, o que pode ser explicado pela remoção da matéria orgânica da mangueira no 139º dia (Fig. 5.14).

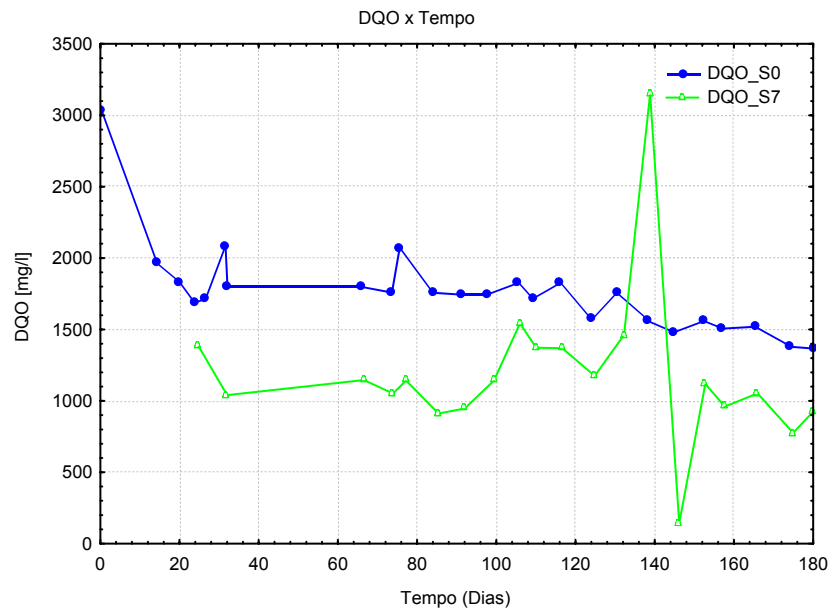


Figura 5.14 – DQO x tempo para ramo úmido

Com base nos valores de DQO encontrados, observa-se que não há um comportamento linear dos dados ao longo do período de monitoramento, apresentando picos que nem sempre coincidem com a entrada e saída. Porém, observa-se que os valores de DQO da saída diminuíram em relação à entrada do sistema, o que mostra que o solo atua como um pré-filtro, minimizando a quantidade de matéria orgânica que atinge o lençol freático. Observa-se ainda que os valores de DQO encontrados para as amostras de líquido percolado estão entre a faixa de valores apresentados por IBAM (2001).

### 5.5.2 Carbono Orgânico Total (COT)

Os menores valores do COT encontrados foram para as amostras compactadas na umidade ótima (S1) e no ramo úmido da curva (S7) (Tabela 5.5), indicando a melhor retenção de matéria orgânica pelo solo.

Tabela 5.5 – Estatística Descritiva do COT

<b>COT</b>	<b>S0</b>	<b>S4</b>	<b>S1</b>	<b>S7</b>
<b>N</b>	27	23	21	22
<b>Média [mg/l]</b>	546,40	375,67	348,57	359,55
<b>Mínimo [mg/l]</b>	276,50	208,70	241,30	125,70
<b>Máximo [mg/l]</b>	894,30	601,60	449,70	593,90
<b>Desvio Padrão</b>	152,85	96,84	57,96	99,18

Nas Figuras 5.15, 5.16 e 5.17 observam-se as curvas do carbono orgânico total para as amostras analisadas. Na Figura 5.15 observa-se que o valor médio na entrada (S0) foi de 546 mg/l enquanto que na saída (S4) foi próximo de 350 mg/l, verificando-se a diminuição da carga poluidora do líquido percolado após o contato com o solo.

O valor do COT da entrada apresentou vários picos durante o período de monitoramento, sendo que os picos maiores ocorreram no 14° e 76° dia e os menores no 42° e 151° dia.

Nas Figuras 5.15 e 5.17 observa-se uma relação entre os valores de COT da entrada e da saída, sendo que conforme aumentava ou diminuía o valor na entrada o mesmo acontecia nas saídas. Para a saída S1 está relação não está tão clara (Fig. 5.16).

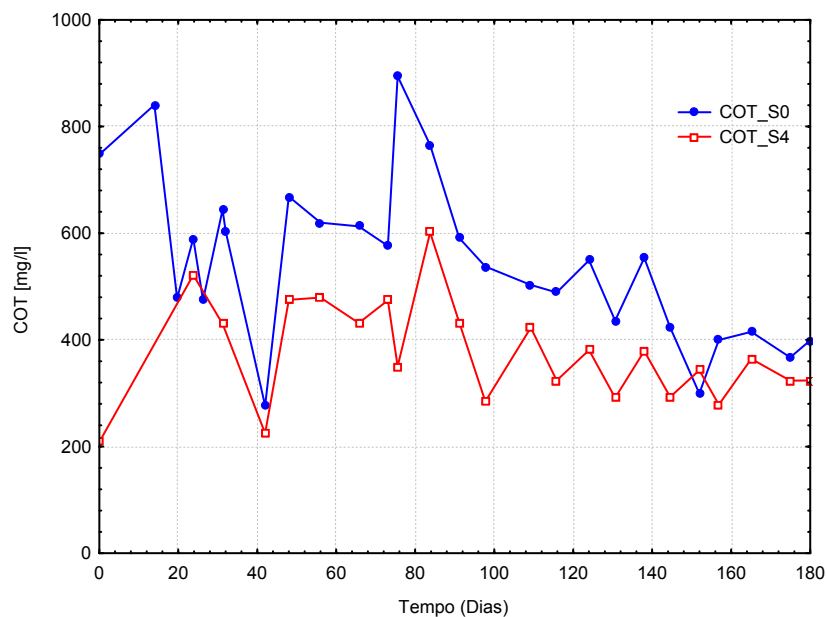


Figura 5.15 – COT x tempo para ramo seco

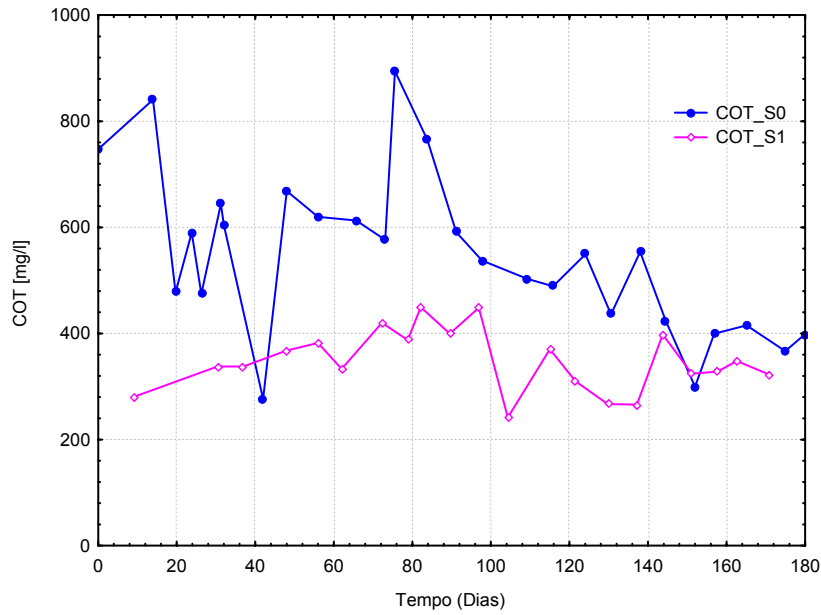


Figura 5.16 – COT x tempo para hot

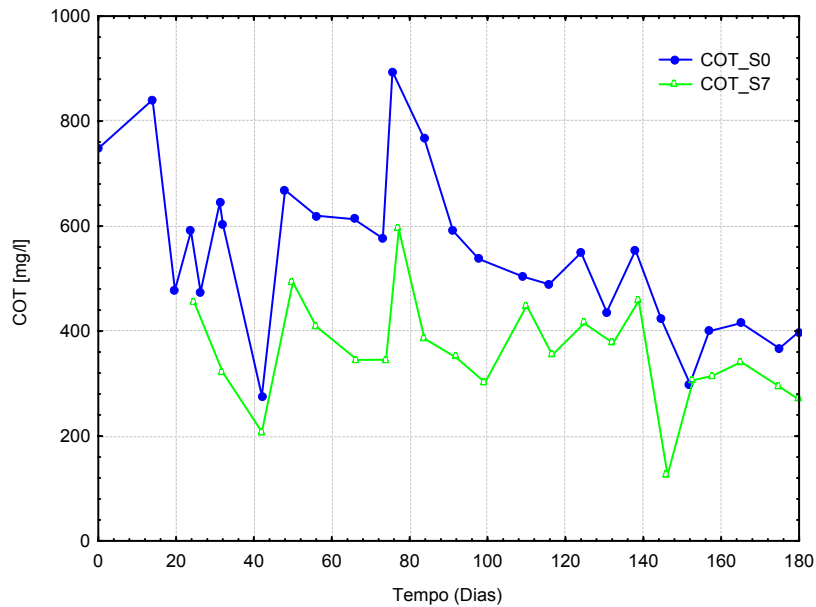


Figura 5.17 – COT x tempo para ramo úmido

### 5.5.3 pH

O valor médio do pH encontrado para todas as amostras classifica o líquido percolado como básico, conforme a Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Estatística Descritiva do pH

<i>pH</i>	<i>S0</i>	<i>S4</i>	<i>S1</i>	<i>S7</i>
<i>N</i>	27	23	22	22
<i>Média [mg/l]</i>	8,68	8,54	8,47	8,59
<i>Mínimo [mg/l]</i>	8,25	7,91	7,76	8,09
<i>Máximo [mg/l]</i>	9,09	8,87	8,88	8,95
<i>Desvio Padrão</i>	0,20	0,21	0,29	0,24

Nas Figuras 5.18, 5.19 e 5.20 observa-se a variação do pH com o tempo. O valor médio do pH na entrada foi de 8,68, sendo que para as saídas houve uma pequena redução devido à reação com o solo. Visualiza-se que a variação do pH estabeleceu uma relação com os líquidos da entrada e das saídas, conforme os picos maiores e menores nos gráficos.

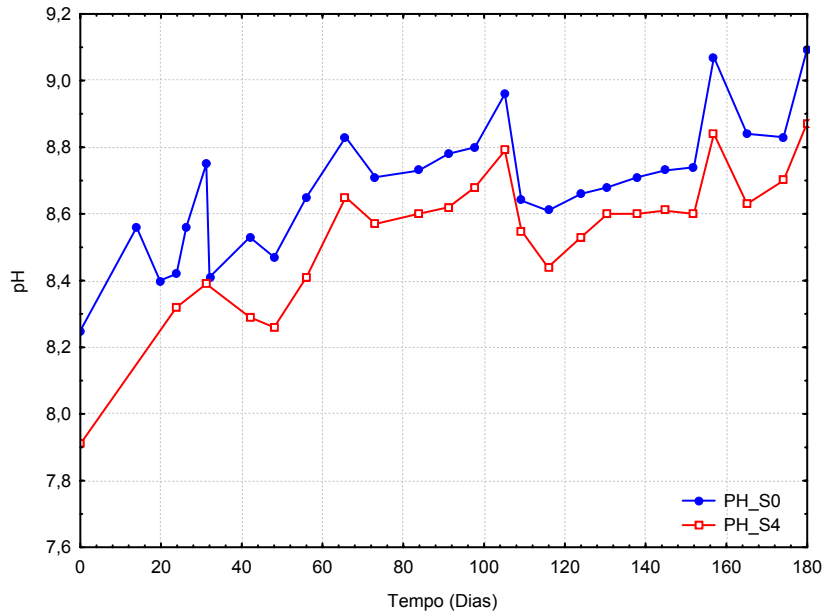


Figura 5.18 – pH x tempo para ramo seco

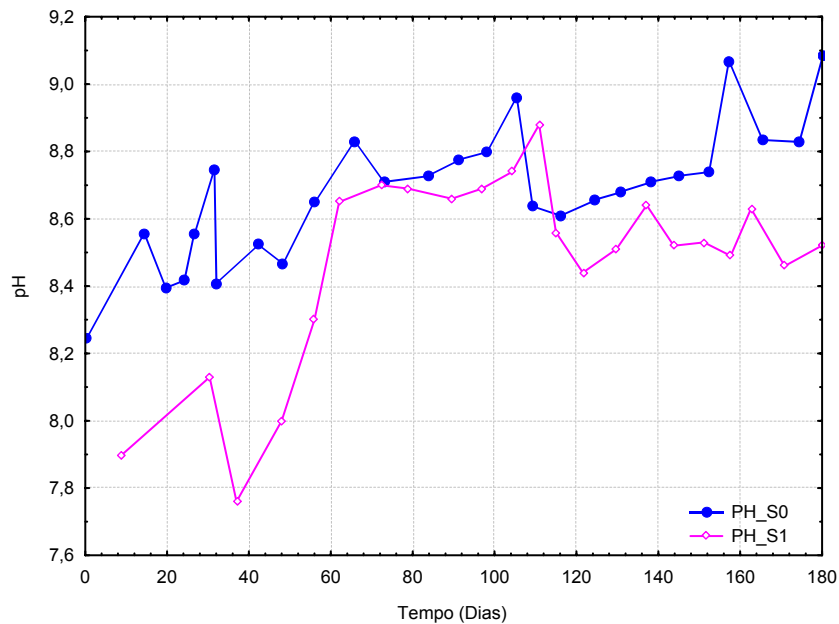


Figura 5.19 – pH x tempo para  $h_{ot}$

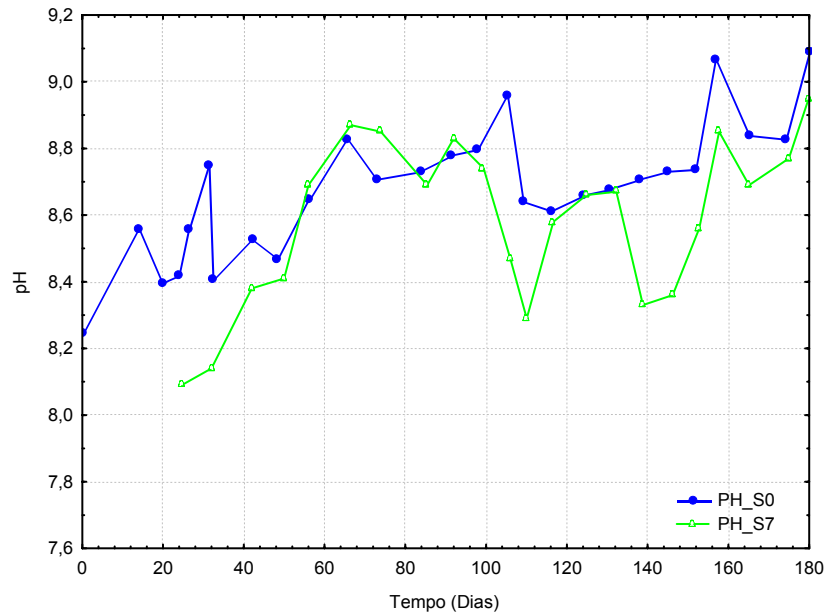


Figura 5.20 – pH x tempo para ramo úmido

#### 5.5.4 Sólidos Totais, Fixos e Voláteis

O teor médio de sólidos fixos para o líquido da entrada foi de 84,90% e de sólidos voláteis foi de 15,10%, valor este que indica a quantidade de matéria orgânica existente. O valor máximo dos sólidos totais foi de 7664 mg/l no 131º dia e o mínimo de 6290 mg/l no 109º dia (Fig. 5.21).

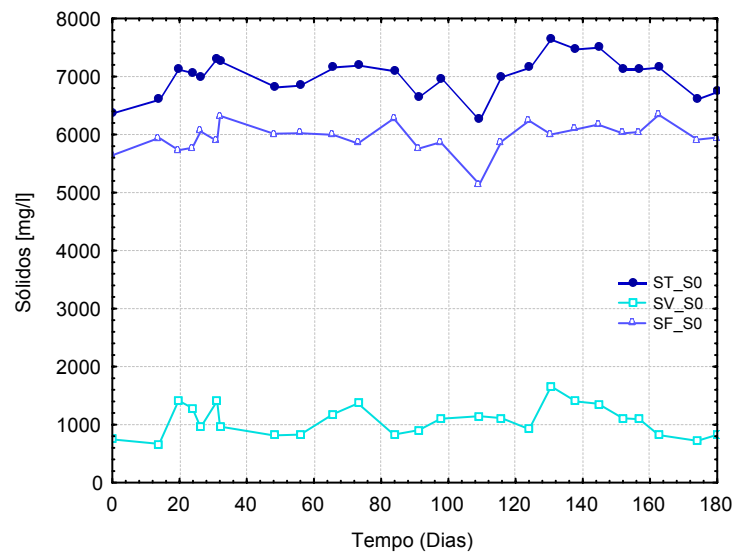


Figura 5.21 – Sólidos x tempo para entrada

Para o ramo seco, o valor máximo dos sólidos totais foi de 6780 mg/l no 24º dia e o mínimo de 5694 mg/l no 174º dia. No 73º dia houve o valor mínimo dos sólidos fixos

e máximo dos sólidos voláteis (Fig. 5.22). O teor médio de sólidos fixos foi de 89,13% e de sólidos voláteis foi de 10,87%.

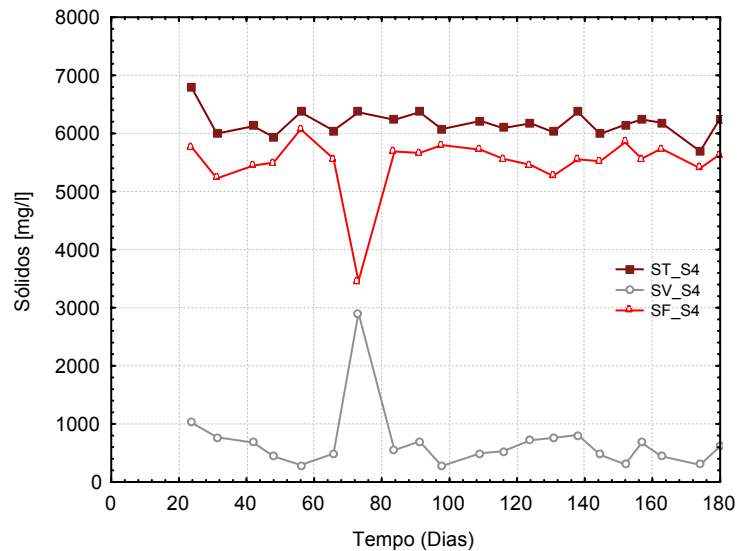


Figura 5.22 - Sólidos x tempo para ramo seco

Para a amostra compactada na umidade ótima, o valor médio dos sólidos totais foi de 5927,9 mg/l. No 55° dia houve uma queda no valor dos sólidos totais com valor mínimo, e no 137° dia com valor máximo (Fig. 5.23). O teor médio de sólidos fixos foi de 88,68 % e de sólidos voláteis foi de 11,32 %

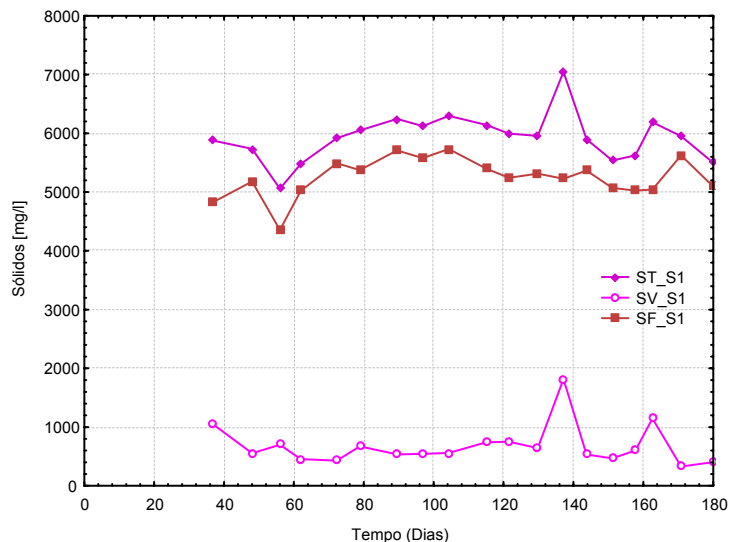


Figura 5.23 - Sólidos x tempo para  $h_{ot}$

O teor médio de sólidos fixos para o ramo úmido foi de 87,74% e de sólidos voláteis foi de 12,26%. O valor médio dos sólidos totais foi de 5828 mg/l. No 146° dia houve o valor mínimo dos sólidos totais, igual a 1876 mg/l. Neste dia os valores da DQO e do COT também apresentaram valores mínimos, conforme já explicado (Fig. 5.24).



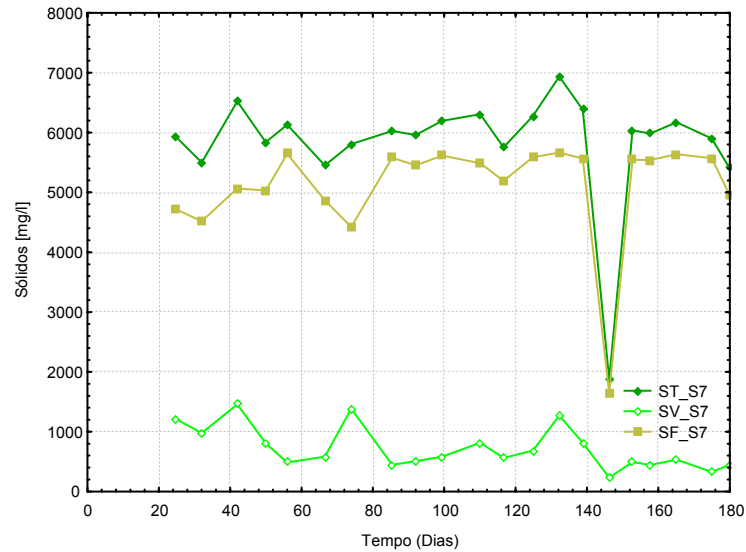


Figura 5.24 - Sólidos x tempo para ramo úmido

### 5.5.5 Metais

Os metais analisados no líquido da entrada dos permeâmetros estão apresentados na Tabela 5.7. Conforme os valores apresentados na Resolução do CONAMA n° 357 de 2005, para lançamento de efluentes, observa-se que o manganês está 0,216 mg/l acima do valor especificado e o cromo com 0,007 mg/l acima do padrão.

Tabela 5.7 – Metais no líquido da entrada

<b>Metal</b>	<b>Concentração [mg/l]</b>	<b>Valor Máximo CONAMA n° 357 [mg/l]</b>
<b>Ni</b>	0,500	2,000
<b>Zn</b>	0,254	5,000
<b>Fe</b>	10,860	15,000
<b>Mg</b>	75,540	-
<b>Mn</b>	1,216	1,000
<b>Cd</b>	< 0,040	0,200
<b>Cu</b>	< 0,120	1,000
<b>Ca</b>	6,040	-
<b>Pb</b>	< 0,320	0,500
<b>Cr</b>	0,507	0,500

Para os líquidos da saída do sistema, foram verificados os seguintes metais: níquel, zinco, ferro, magnésio, manganês, cálcio e cromo. Os metais que apresentaram concentração menor que o limite de detecção (LD) na entrada do sistema não foram analisados nas saídas dos permeâmetros (cádmio, cobre e chumbo). Os metais níquel e cromo não foram detectados (ND) na saída do sistema, estando com valores menores que o limite de detecção (0,133 e 0,074 respectivamente).

### a) Ferro

O Limite de Detecção (LD) do ferro no aparelho é de 0,106 mg/l. Para o líquido de entrada o valor da concentração foi de 10,86 mg/l, sendo o valor máximo aceito pelo CONAMA de 15 mg/l.

Na Fig. 5.25 observa-se a variação do ferro nos permeâmetros. Observa-se que até o dia 100 do monitoramento a quantidade de ferro que saiu do sistema diminui com o tempo, ou seja, o solo está retendo o metal. No 140º dia, para as saídas S1 e S7 a concentração foi maior que na entrada, o que pode ser explicado pela ocorrência da lixiviação ou até contaminação da amostra.

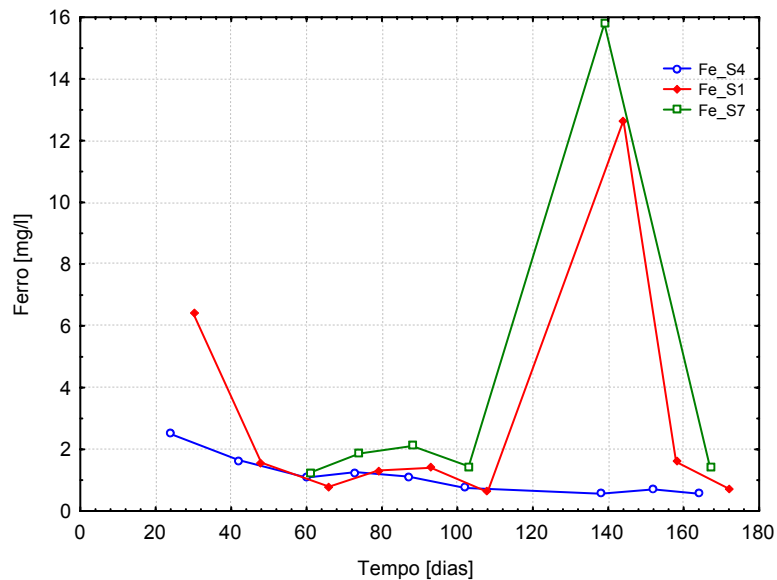


Figura 5.25 – Concentração de ferro nos permeâmetros

### b) Zinco

O Limite de Detecção (LD) do zinco no aparelho é de 0,0078 mg/l. Para o líquido de entrada o valor da concentração foi de 0,254 mg/l, sendo o valor máximo aceito pelo CONAMA de 5 mg/l.

Na Fig. 5.26 observa-se a concentração do zinco para os permeâmetros. Vários pontos nas saídas apresentaram concentração com valor abaixo do limite de detecção. Para a unidade ótima verificou-se um pico maior que nos demais casos, chegando a 0,150 mg/l, porém todos os valores foram inferiores ao da entrada.

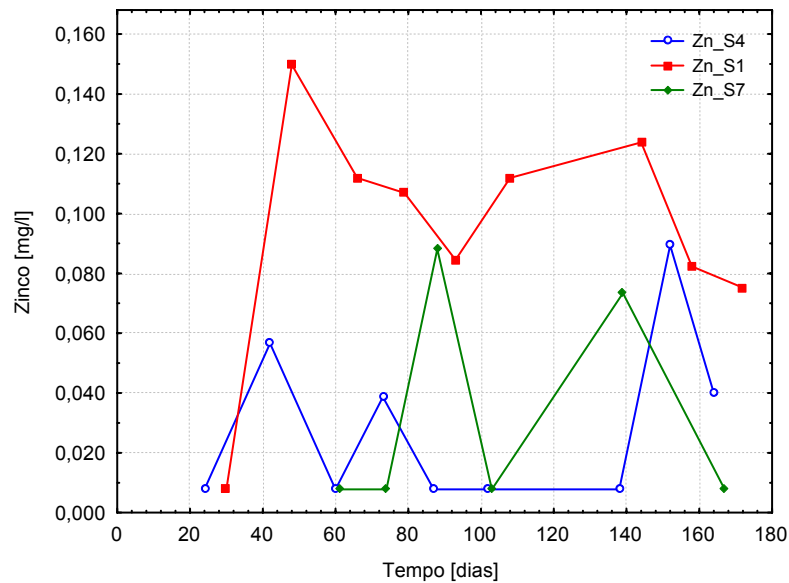


Figura 5.26 – Concentração de zinco nos permeâmetros

### c) Magnésio

O Limite de Detecção (LD) do magnésio é de 0,004 mg/l. Para o líquido de entrada o valor da concentração foi de 75,54 mg/l. Para este valor necessitou-se diluir a amostra para a possível leitura no aparelho. Devido ao grande número de amostras analisadas e ainda por serem duplicatas, optou-se por analisar apenas três amostras por grau de compactação.

Na Tabela 5.8 observa-se que o solo está retendo o magnésio ao longo do tempo, visível pela redução da concentração do metal. Para o ramo seco no 24° dia, a concentração do metal na saída foi maior do que na entrada, o que pode ser explicado pela lixiviação da amostra.

Tabela 5.8 – Concentração do magnésio

Dia	Ramo Seco	Umidade Ótima	Ramo Úmido
24	119,874		
30		62,244	
61			9,631
87	0,568		
88			1,782
93		1,188	
164	28,890		
167			0,401
172		0,355	

### d) Manganês

O LD do Mn é 0,085 mg/l. Para o líquido de entrada a concentração foi de 1,216 mg/l. Para as saídas, o valor máximo do Mn foi de 0,536 mg/l, indicando a retenção do metal pelo solo. Conforme a Fig. 5.27, várias amostras tiveram concentração menor que o LD.

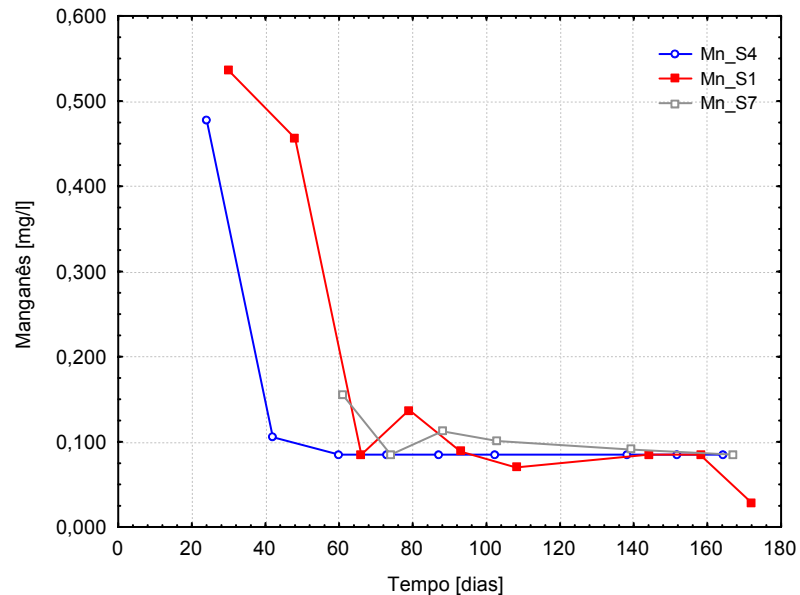


Figura 5.27 – Concentração do manganês nos permeâmetros

### e) Cálcio

Para o líquido de entrada o valor da concentração foi de 6,04 mg/l, com LD de 0,029 mg/l. Para as saídas, o valor máximo foi de 2,60 mg/l (Fig. 5.28). Observa-se que inicialmente a concentração do metal tendeu a diminuir ao longo do monitoramento (retenção pelo solo), porém nos últimos dias ela tendeu a um leve aumento (lixiviação destes metais que foram retidos pelo solo).

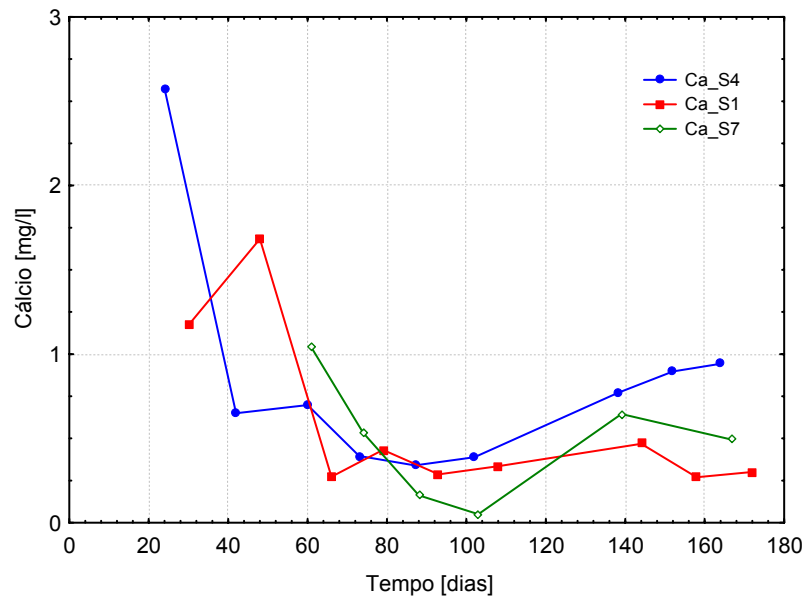


Figura 5.28 – Concentração do cálcio nos permeâmetros

## 6 RESULTADOS DA AM2

A amostra AM2 é utilizada para a camada de base do aterro sanitário de Chapecó.

### 6.1 Caracterização do solo

Este solo é classificado como areia siltosa, apresentando 46,99% areia, 45,40% silte e 7,61% argila (Fig. 6.1)

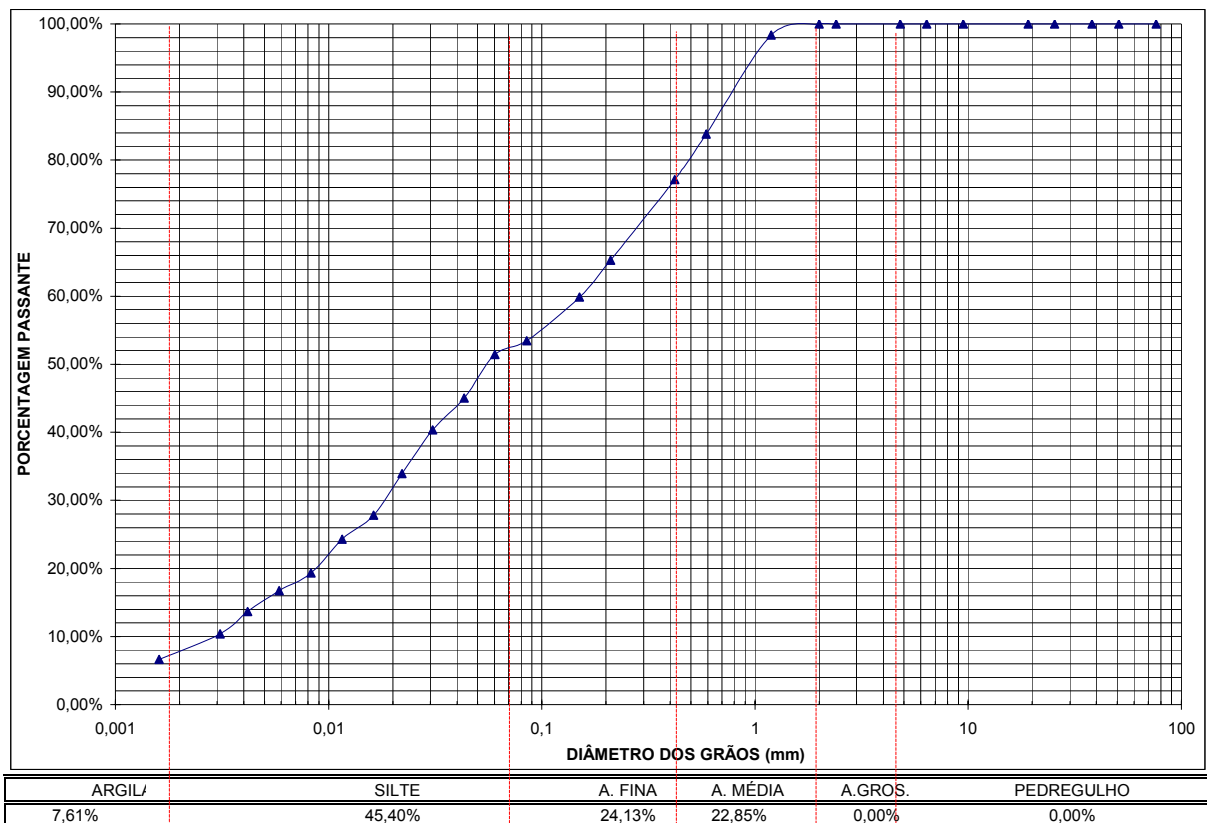


Figura 6.1 – Curva granulométrica da AM2

A massa específica dos grãos do solo é de 2,223 g/cm<sup>3</sup>. Os limites de Atterberg determinados são: LL = 67 % e LP = 53 %. O índice de plasticidade (IP) é de 14 %, sendo classificado como medianamente plástico.

A umidade ótima obtida pelo ensaio de compactação foi de 36,0 % e a massa específica aparente máxima do solo seco foi de 1,296 g/cm<sup>3</sup>. A curva de compactação está apresentada na Fig. 6.2.

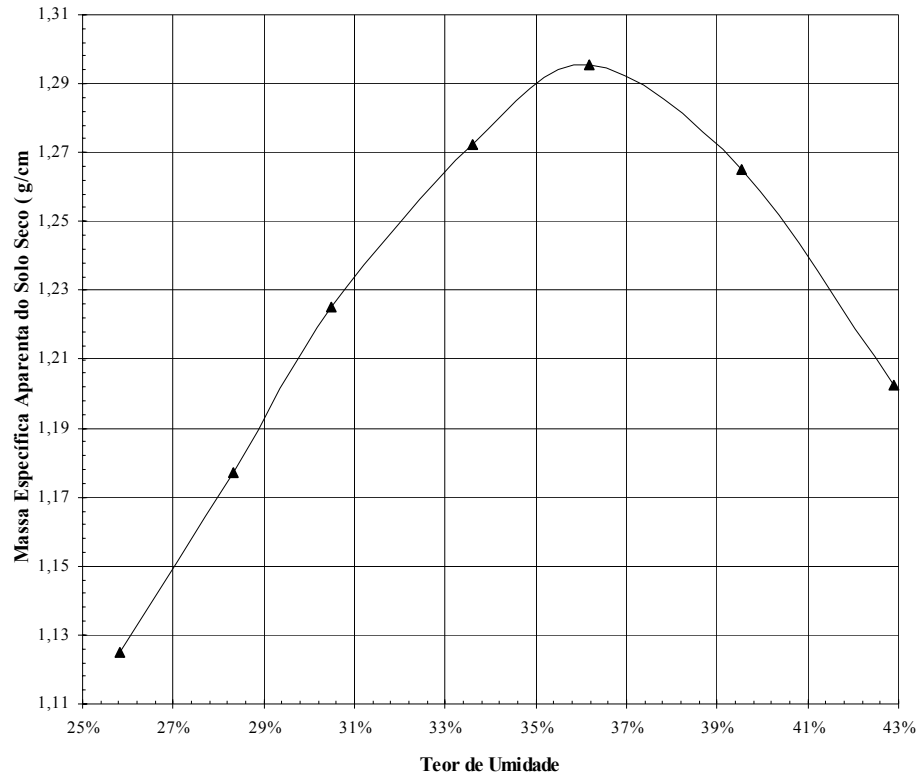


Figura 6.2 – Curva de compactação

Na Tabela 6.1 apresentam-se os valores de umidade, massa específica e grau de compactação obtidos para as amostras compactadas. Destaca-se que o grau de compactação atingido não foi de exatamente 95,00 % devido às dificuldades de compactação como a obtenção da umidade exata e da massa específica.

Tabela 6.1 – Compactação da amostra AM2

Amostra	Ramo Seco (S6)	Umidade Ótima (S2)	Ramo Úmido (S9)
Líquido	Líq. Percolado	Líq. Percolado	Líq. Percolado
Umidade [%]	29,35	32,66	39,82
MEA [g/cm <sup>3</sup> ]	1,249	1,329	1,246
Grau de Compactação [%]	96,37	102,55	96,14
Índice de Vazios (e)	0,78	0,67	0,78
Porosidade (n) [%]	43,81	40,22	43,95

Na Fig. 6.3 observa-se a curva de compactação obtida para as amostras utilizadas nos permeâmetros, na umidade ótima (S2), no ramo seco (S6), no ramo úmido (S9).

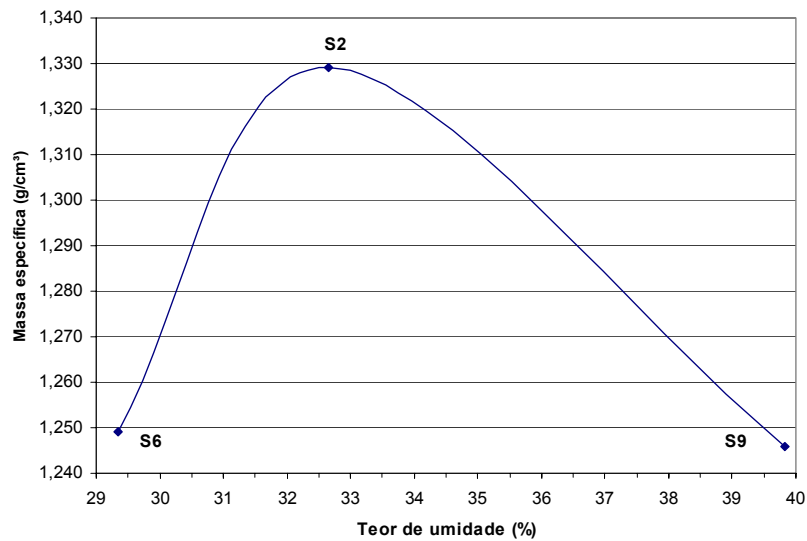


Figura 6.3 – Curva de compactação obtida

## 6.2 Ensaio de permeabilidade

A seguir estão apresentados os resultados do monitoramento da permeabilidade para as amostras percoladas pelo líquido percolado do aterro sanitário.

### 6.2.1 Ramo Seco

A Fig. 6.4 mostra a variação do coeficiente de permeabilidade em função do tempo (180 dias). Observa-se que a permeabilidade do solo diminuiu durante o período de monitoramento, sendo inicialmente em torno de  $7 \cdot 10^{-7}$  cm/s e em 180 dias em torno de  $2 \cdot 10^{-7}$  cm/s. Não foi observada uma tendência por estabilizar, sendo que, se permanecesse o monitoramento, estes valores poderiam ser reduzidos mais ainda. Esta redução na permeabilidade pode ser explicada pela colmatação dos vazios do solo.



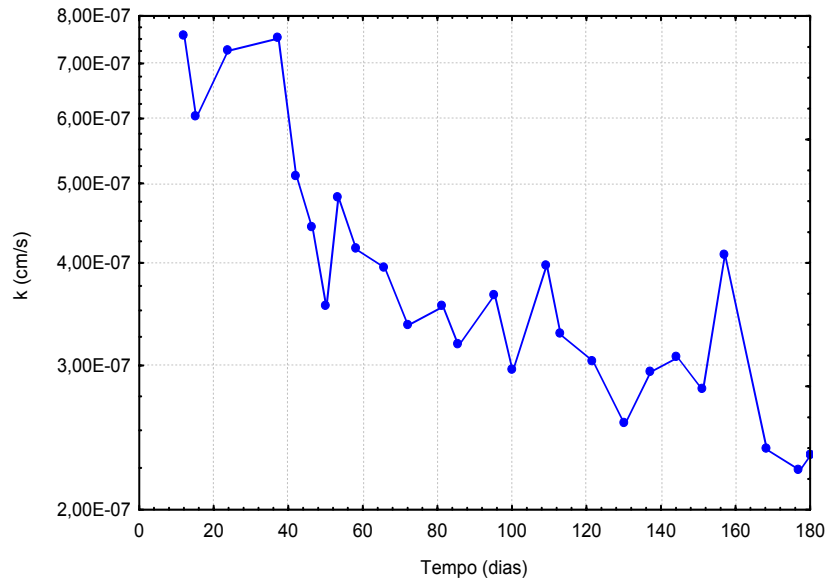


Figura 6.4 – Coeficiente de permeabilidade em função do tempo (S6)

### 6.2.2 Umidade Ótima

Para a amostra compactada na umidade ótima, observa-se que a permeabilidade do solo também diminuiu durante o período de monitoramento, sendo inicialmente  $9 \cdot 10^{-7}$  cm/s e em 180 dias em torno de  $2 \cdot 10^{-7}$  cm/s. No dia 109 houve uma queda no valor da permeabilidade ( $1,42 \cdot 10^{-7}$  cm/s), o que pode ter sido um erro de leitura ou oscilação da temperatura (Fig. 6.5). Verifica-se a ocorrência de colmatção dos vazios do solo como no ramo seco.

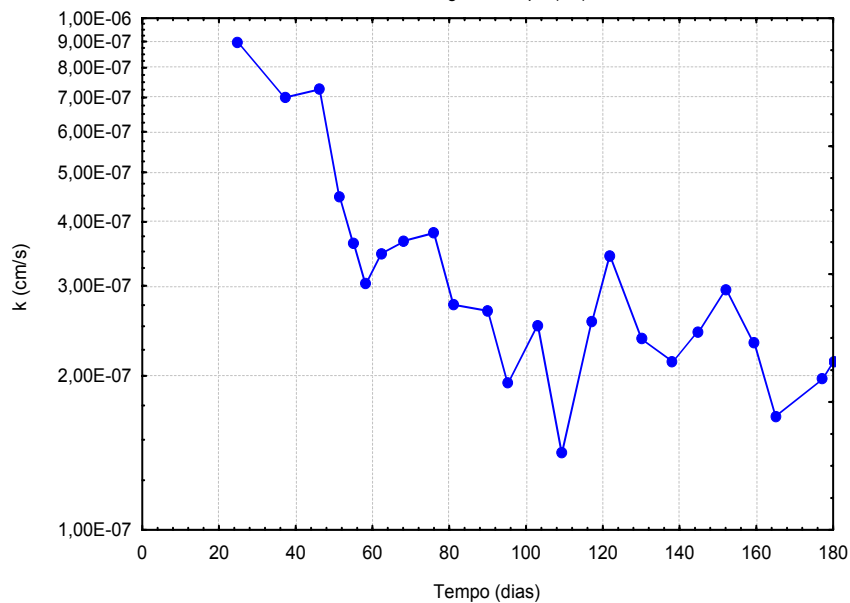


Figura 6.5 – Coeficiente de permeabilidade em função do tempo (S2)

### 6.2.3 Ramo Úmido

A Fig. 6.6 mostra a variação do coeficiente de permeabilidade em função do tempo. Verifica-se que a permeabilidade do solo diminuiu durante o período de monitoramento, sendo inicialmente em torno de  $5.10^{-7}$  cm/s e em 180 dias em torno de  $9.10^{-8}$  cm/s. No dia 100 houve uma queda no valor do coeficiente de permeabilidade ( $7,5.10^{-8}$  cm/s) e no dia 143 um pico de  $2,6.10^{-7}$  cm/s, que podem ter ocorrido devido a precisão do ensaio. Não houve uma tendência à estabilização da permeabilidade durante este período de monitoramento, podendo o valor estar diminuindo ainda devido a colmatação do solo.

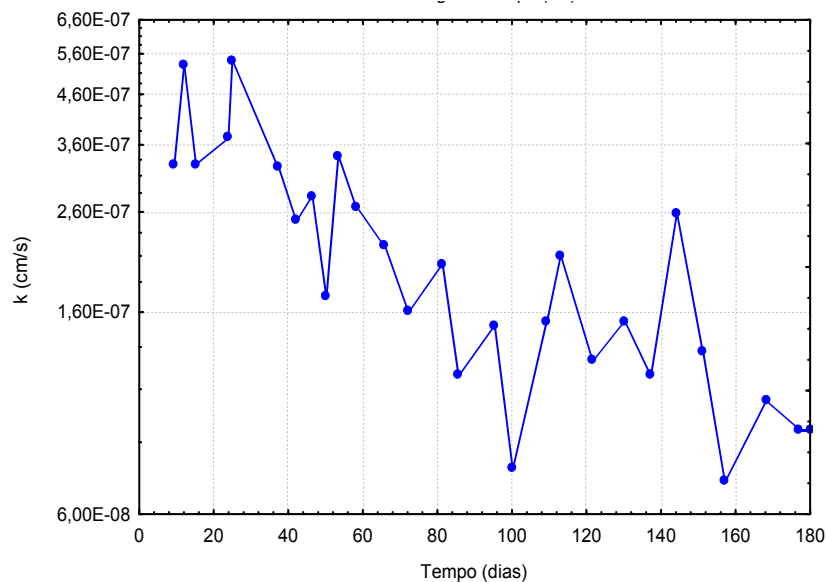


Figura 6.6 – Valores do coeficiente de permeabilidade em função do tempo (S9)

### 6.2.4 Resumo

Na Tabela 6.2 observa-se um resumo dos valores dos coeficientes de permeabilidade médios encontrados para as amostras do aterro sanitário de Timbó, analisados mensalmente.

Através desta análise, observa-se que o valor do coeficiente de permeabilidade médio foi diminuindo a cada mês, sendo que para o ramo úmido o valor tendeu a ser bem menor que os outros (Fig. 6.7). Este solo, para todos os graus de compactação

apresentou valores do coeficiente de permeabilidade menor que  $10^{-7}$  cm/s, estando adequado a impermeabilização.

**Tabela 6.2 – Resumo dos valores de permeabilidade**

Período [dias]	$k_{méd}$ [cm/s]		
	Ramo Seco	$h_{ot}$	Ramo Úmido
0 a 30	6,95E-07	9,76E-07	4,21E-07
31 a 60	4,94E-07	5,10E-07	2,73E-07
61 a 90	3,52E-07	3,29E-07	1,75E-07
91 a 120	3,47E-07	2,11E-07	1,47E-07
121 a 150	2,90E-07	2,60E-07	1,64E-07
151 a 180	2,77E-07	2,22E-07	9,80E-08

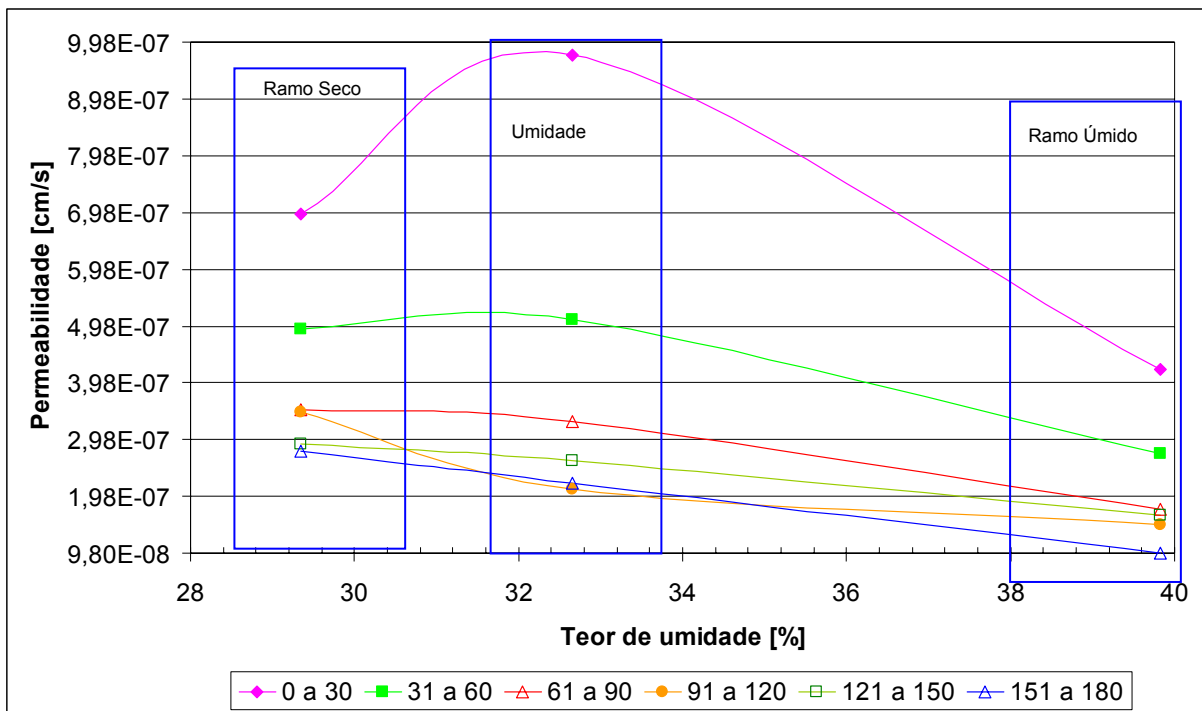


Figura 6.7 – Variação da permeabilidade média para as diferentes amostras compactadas

### 6.3 Análises químicas

Conforme a Tabela 6.3, o valor do pH sofreu grandes alterações, com valor inicial de 5,30 (muito baixo), classificado como solo ácido; e após a percolação com valor de 8,70 (Ramo seco), 8,50 (umidade ótima) e 8,40 (ramo úmido); classificado como solo básico. Essa alteração do pH em todas as amostras é explicada pela passagem do líquido percolado (pH médio de 8,69).

Tabela 6.3 - Resultados da análise química dos solos

Determinação	Amostra natural	Ramo Seco S6	Umidade Ótima – S2	Ramo Úmido – S9
pH	5,30	8,70	8,50	8,40
Matéria orgânica [%]	0,50	0,70	0,60	0,70
CTC [cmol <sub>e</sub> /l]	36,12	18,46	17,61	17,19
Fósforo [mg/l]	26,50	31,40	29,40	28,60
Potássio [mg/l]	38,00	2688,00	1764,00	1659,00
Cálcio [cmol <sub>e</sub> /l]	17,00	2,20	3,60	3,70
Magnésio [cmol <sub>e</sub> /l]	11,20	4,30	4,90	4,60
Sódio [mg/l]	18,00	1008,00	900,00	880,00

O teor de matéria orgânica sofreu alterações, inicialmente de 0,50% e após o contato com o líquido passou para 0,70 e 0,60%, porém ainda classificado como baixo. Destaca-se que o solo na umidade ótima apresentou o valor mais próximo do solo natural (0,60).

A Capacidade de Troca Catiônica (CTC), inicialmente com valor de 36,12 cmol<sub>e</sub>/l (valor alto, maior que a AM1), mudou para 18,46 cmol<sub>e</sub>/l (ramo seco), 17,61 (umidade ótima) e 17,19 (ramo úmido). Todos os valores são altos.

A concentração do fósforo não apresentou grandes alterações após a percolação. Já para o potássio, a amostra natural apresentou 38,00 mg/l e após a percolação este valor aumentou muito, chegando a 2688 mg/l para o ramo seco. Quanto ao sódio, o valor antes da contaminação foi de 18,00 mg/l e após o contato foi para 1000,00 mg/l, ocorrendo um aumento da concentração devido ao contato com o líquido percolado, indicando a retenção do metal pelo solo.

A concentração do cálcio e magnésio na amostra natural foi maior, sendo que para as amostras percoladas com o líquido este valor reduziu, indicando uma possível lixiviação do solo.

## 6.4 Análises micro-estruturais

Através da mineralogia total do solo, antes do contato com o líquido percolado, observaram-se a predominância dos seguintes minerais: esmectita, illita, caolinita, quartzo, rodocrosita e hematita. Após o contato com o líquido percolado, os minerais encontrados no solo foram: caolinita, quartzo, hematita, calcita, montmorilonita.

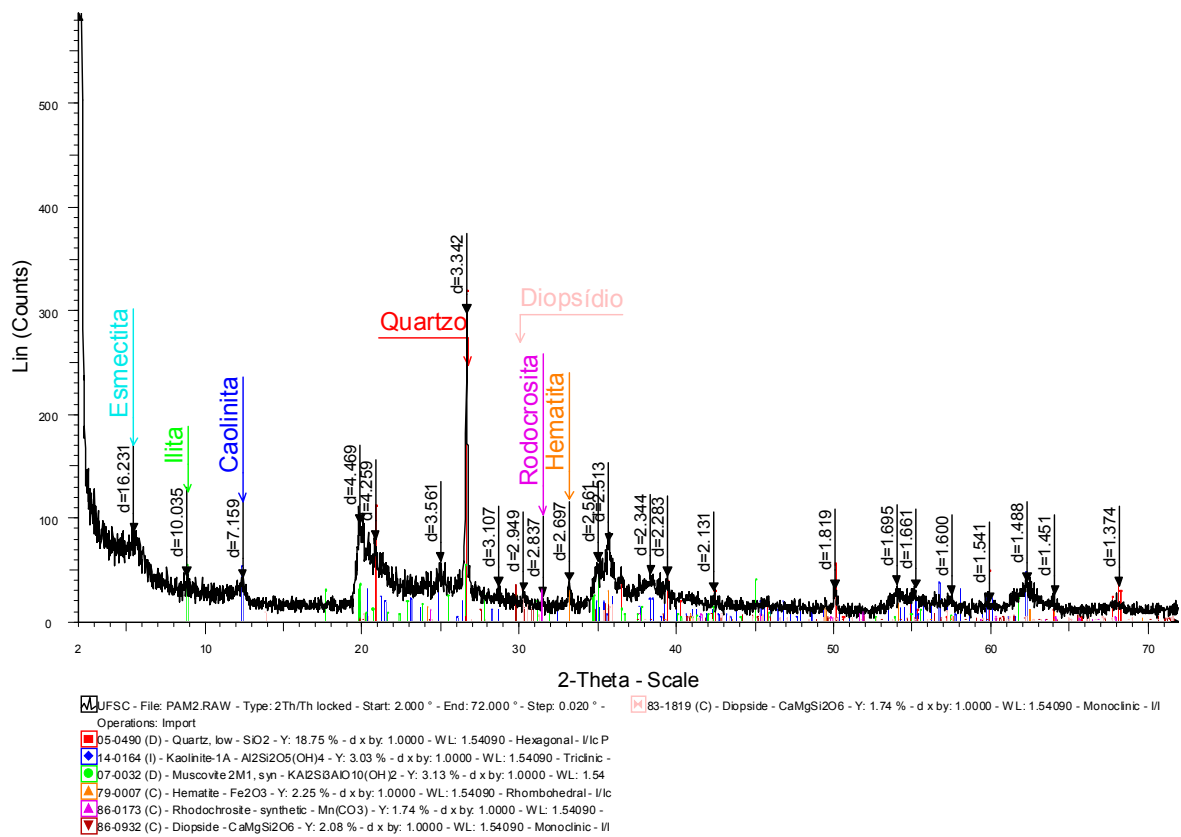


Figura 6.8 - Curva da difratometria de raios X antes da percolação

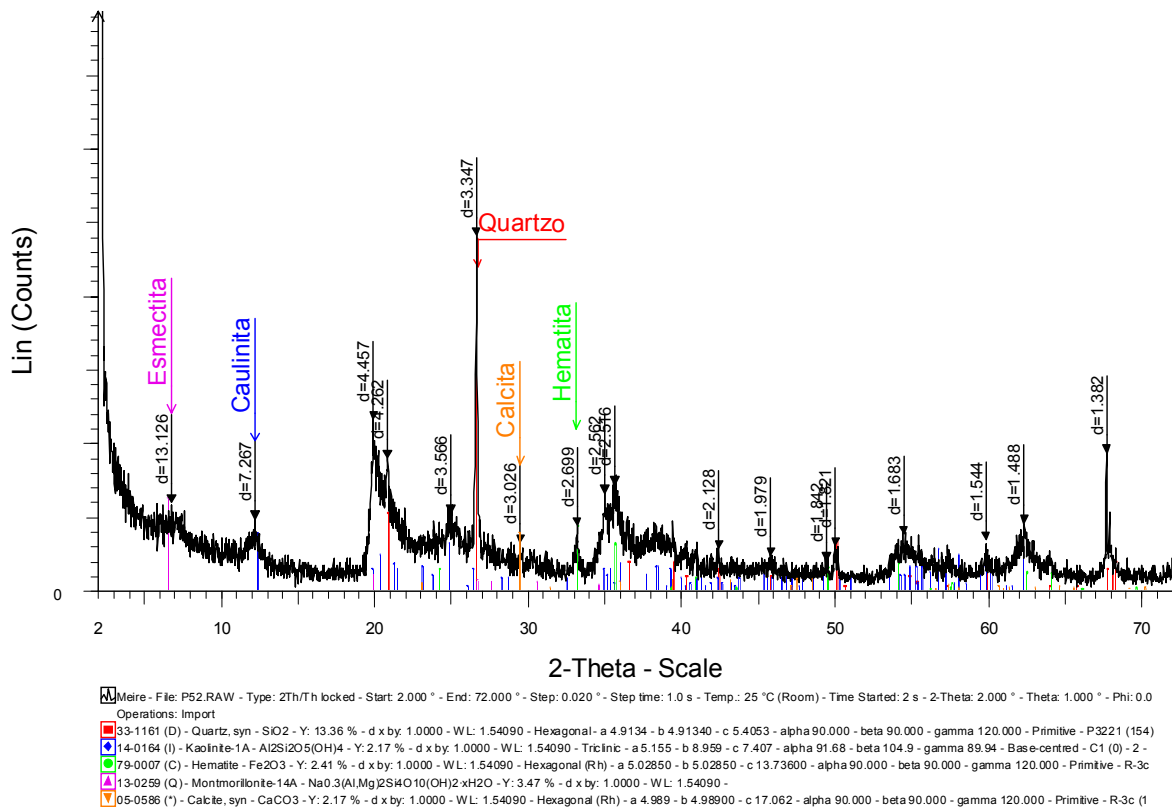


Figura 6.9 - Curva da difratometria de raios X após a percolação

Através do laudo desta análise, apenas os minerais caulinita, quartzo e hematita foram observados nas amostras de solo antes e após o contato com o líquido. Após o contato foi verificada a presença da montmorilonita, mineral bem expansivo.

### 6.5 Análises com o líquido percolado

O líquido foi coletado na entrada (S0), na umidade ótima (S2), no ramo seco (S6) e no ramo úmido (S9), conforme mostra a Fig. 6.10 (APÊNDICE D).



Figura 6.10 - Amostras que percolaram o solo de Chapecó

### 6.5.1 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A Tabela 6.4 apresenta a estatística descritiva da DQO na forma dos valores da média, mínimo, máximo e desvio padrão. Com relação às amostras compactadas, observou-se que o solo compactado no ramo úmido da curva de compactação (S9) apresentou o menor valor da média da DQO.

**Tabela 6.4 – Estatística Descritiva da DQO**

DQO	S0	S6	S2	S9
<b>N</b>	25	22	20	22
<b>Média [mg/l]</b>	1768,52	1198,12	1085,82	905,70
<b>Mínimo [mg/l]</b>	1370,65	636,20	619,70	379,30
<b>Máximo [mg/l]</b>	3034,15	1476,45	2302,25	1292,20
<b>Desvio Padrão</b>	322,10	218,46	383,91	241,56

Na Fig. 6.11 observa-se a variação da DQO com o tempo para o líquido da entrada do sistema e para a saída no ramo seco (S6). Observa-se que o valor médio da entrada foi de 1768 mg/l enquanto que na saída foi de 1198 mg/l.

Para o líquido percolado coletado na saída do permeâmetro, no primeiro dia de coleta (dia 17) o valor da DQO era de 1500 mg/l, sendo que ocorreu o valor mínimo no dia 23. Nos demais dias o valor da DQO permaneceu aproximadamente de 1300 mg/l. Após o dia 170 o valor diminuiu para 900 mg/l.

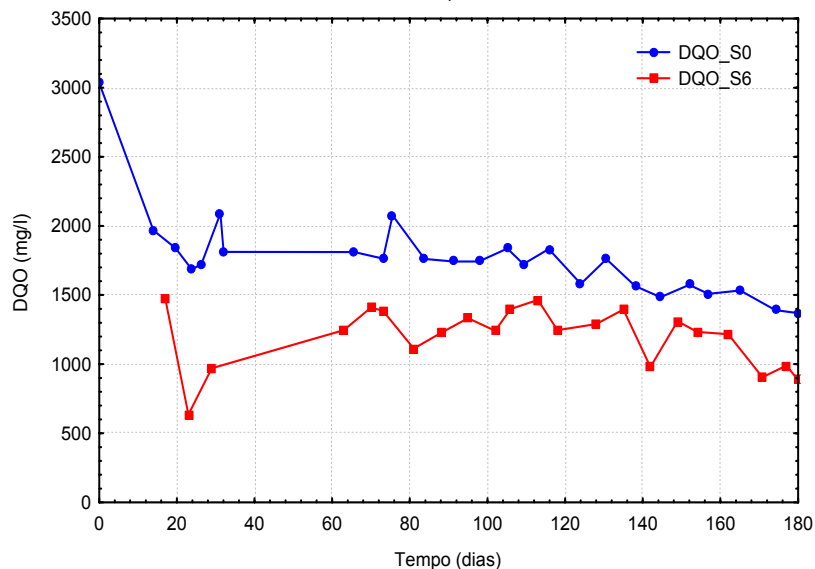


Figura 6.11 – Gráfico da DQO em função do tempo para ramo seco

Na Fig. 6.12 observa-se a variação da DQO com o tempo para a amostra compactada na umidade ótima. Observa-se que o valor médio da entrada foi de 1768 mg/l enquanto que na saída foi de 1080 mg/l. Para a saída S2, no dia 23, o valor da DQO era de 2300 mg/l, sendo que no dia 32 o valor diminuiu para 960 mg/l.

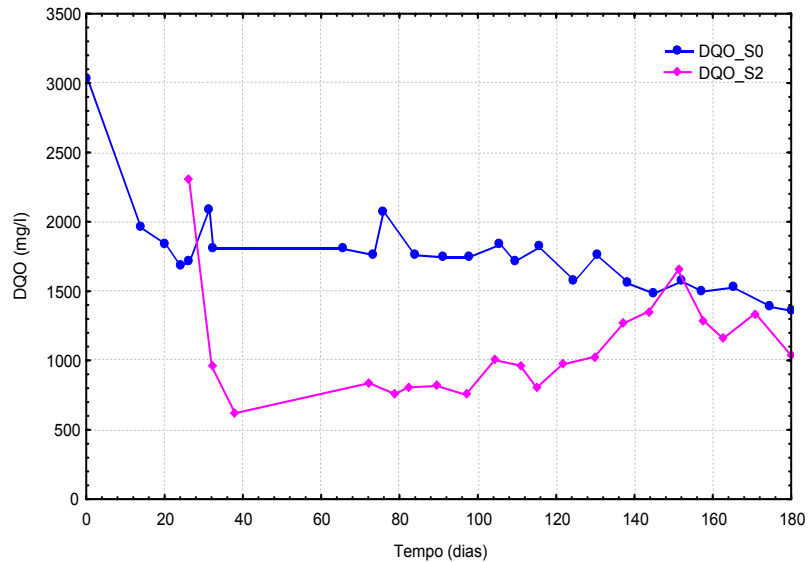


Figura 6.12 – DQO em função do tempo para  $h_{ot}$

Para o ramo úmido, o valor da DQO permaneceu abaixo de 1000 mg/l até o dia 128 de monitoramento, após este dia o valor ficou em torno de 1200 mg/l (Fig. 6.13).

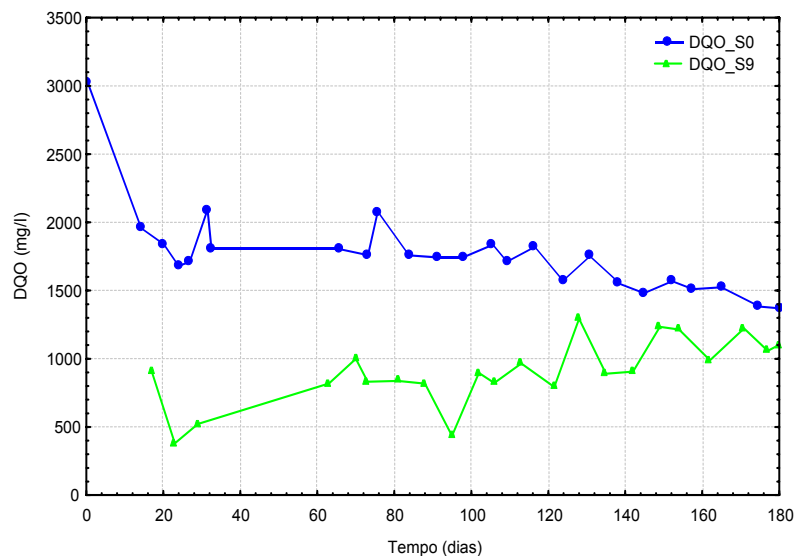


Figura 6.13 – DQO em função do tempo para ramo úmido

Igualmente às amostras do aterro sanitário de Timbó, verifica-se que não há um comportamento linear dos dados ao longo do período de monitoramento. Observa-se ainda que os valores de DQO da saída diminuíram em relação à entrada do sistema.



### 6.5.2 Carbono Orgânico Total (COT)

Os valores de COT estão apresentados na Tabela 6.5. O menor valor da média do COT foi para a amostra compactada no ramo úmido, coincidindo com a DQO.

**Tabela 6.5 – Estatística Descritiva do COT**

COT	S0	S6	S2	S9
<b>N</b>	27	24	22	24
<b>Média [mg/l]</b>	546,40	391,71	314,52	299,99
<b>Mínimo [mg/l]</b>	276,50	240,40	169,30	151,80
<b>Máximo [mg/l]</b>	894,30	555,80	626,80	379,70
<b>Desvio Padrão</b>	152,85	69,32	91,53	55,95

Na Fig. 6.14 observa-se a variação do COT com o tempo para o líquido da entrada do sistema e para a saída no ramo seco (S6). Observa-se que o valor médio da entrada foi de 546 mg/l enquanto que na saída foi de 391 mg/l. Observa-se que o valor do COT da saída apresentou valores menores do que o líquido da entrada, sendo o maior pico de 556,00 mg/l.

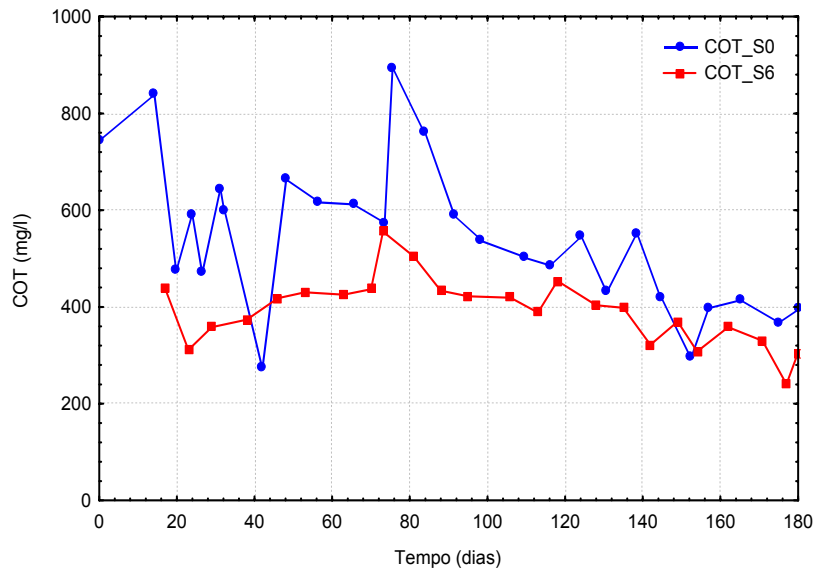


Figura 6.14 – COT em função do tempo para ramo seco

Na Fig. 6.15 observa-se a variação do COT com o tempo para o líquido da entrada do sistema e para a saída na umidade ótima (S2). Observa-se que o valor médio da entrada foi de 546 mg/l enquanto que na saída foi de 314 mg/l.

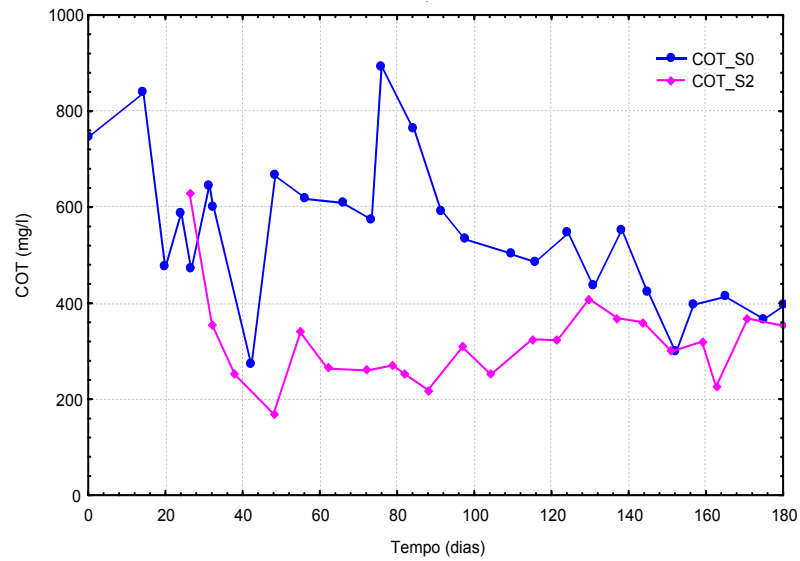


Figura 6.15 – COT em função do tempo para  $h_{ot}$

Para o ramo úmido, observa-se que o valor médio da entrada foi de 546 mg/l enquanto que na saída foi de 300 mg/l (Fig. 6.16).

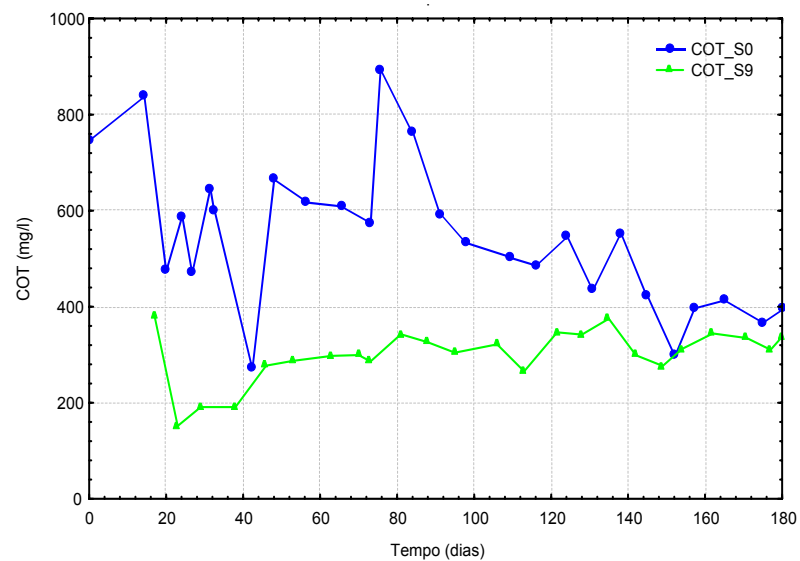


Figura 6.16 – COT em função do tempo para ramo úmido

### 6.5.3 pH

A Tabela 6.6 apresenta os valores de pH, classificados como básico.

Tabela 6.6 – Estatística Descritiva do pH

pH	S0	S6	S2	S9
<b>N</b>	27	24	22	24
<b>Média [mg/l]</b>	8,68	8,40	8,02	8,14
<b>Mínimo [mg/l]</b>	8,25	7,78	6,83	7,42
<b>Máximo [mg/l]</b>	9,09	8,80	8,81	8,69
<b>Desvio Padrão</b>	0,20	0,28	0,42	0,34

Nas Figuras 6.17, 6.18 e 6.19 observa-se a variação do pH com o tempo para o líquido da entrada e para as saídas.

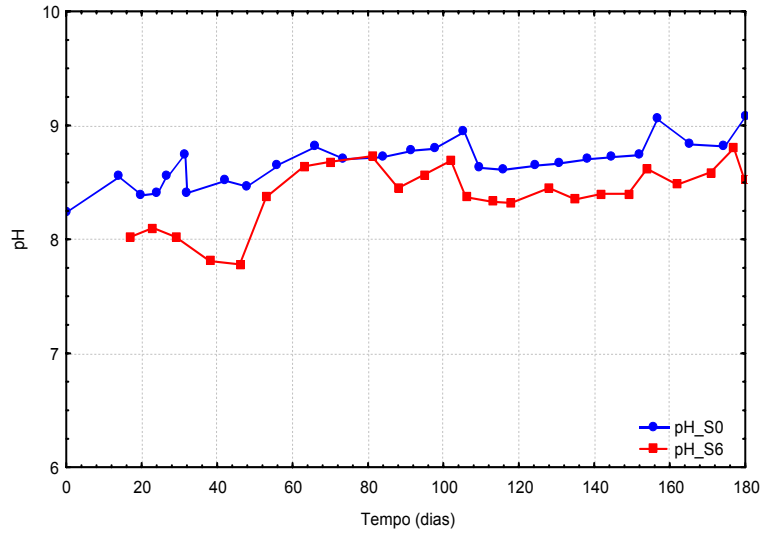


Figura 6.17 – pH em função do tempo para ramo seco

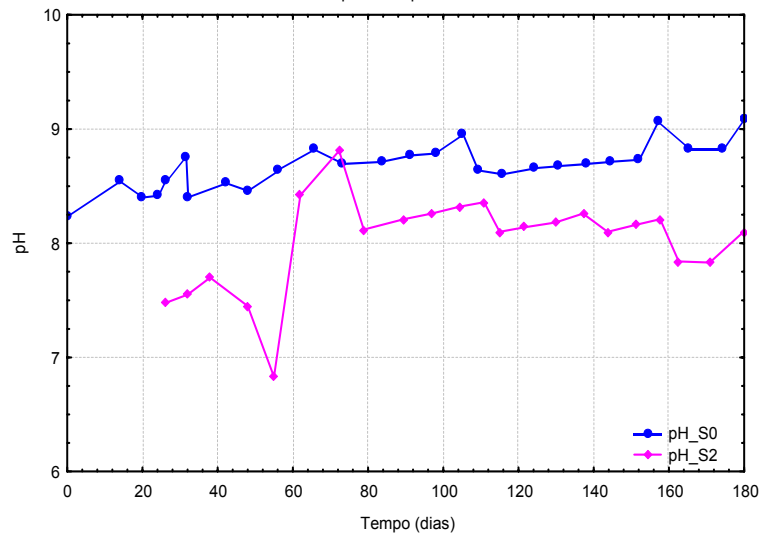


Figura 6.18 – pH em função do tempo para h<sub>ot</sub>

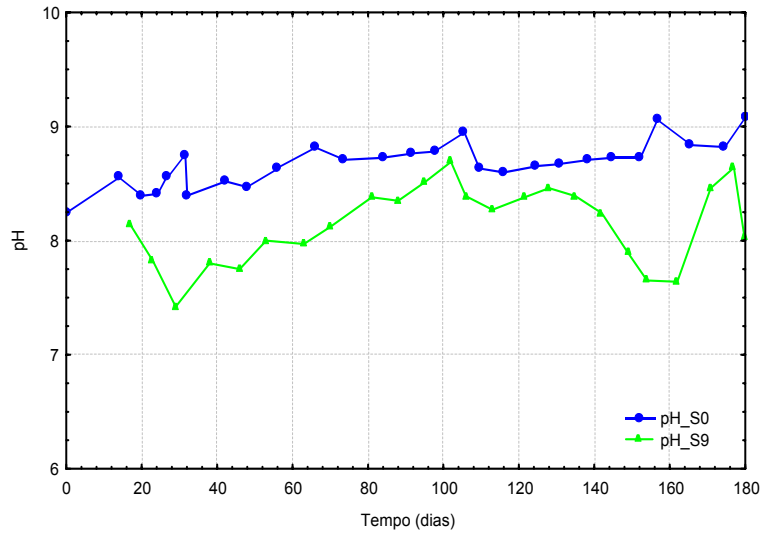


Figura 6.19 – pH em função do tempo para ramo úmido

#### 6.5.4 Sólidos Totais, Fixos e Voláteis

O teor de sólidos fixos, para o ramo seco, é de 15,09% e voláteis de 84,91%. No 29º dia observa-se que o valor dos sólidos totais caiu para 2500 mg/l e os fixos para 2000 mg/l (Fig. 6.20).

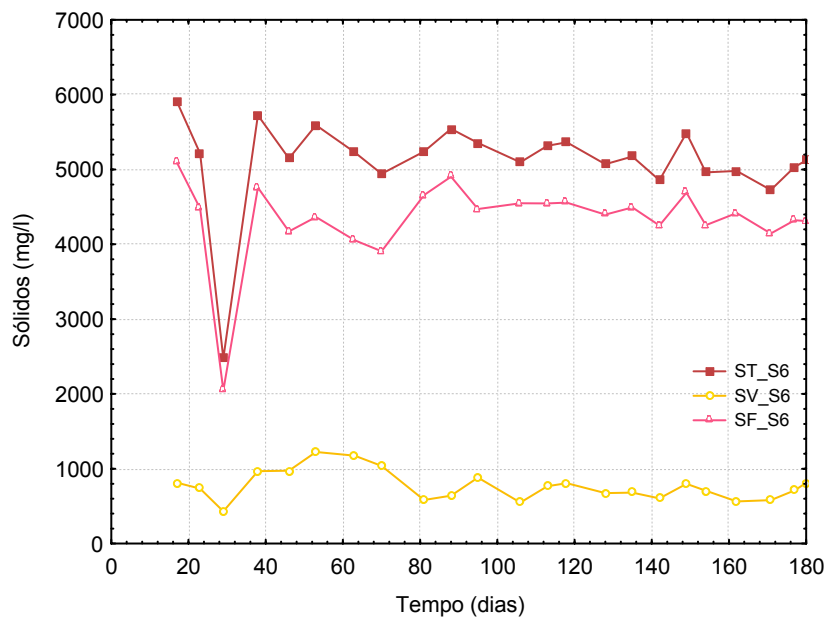


Figura 6.20 – Sólidos em função do tempo para ramo seco

O teor de sólidos fixos, para a umidade ótima, é de 20,67% e voláteis de 79,33%. No 55º dia houve um pico do valor dos sólidos totais de 5840 mg/l (Fig. 6.21).

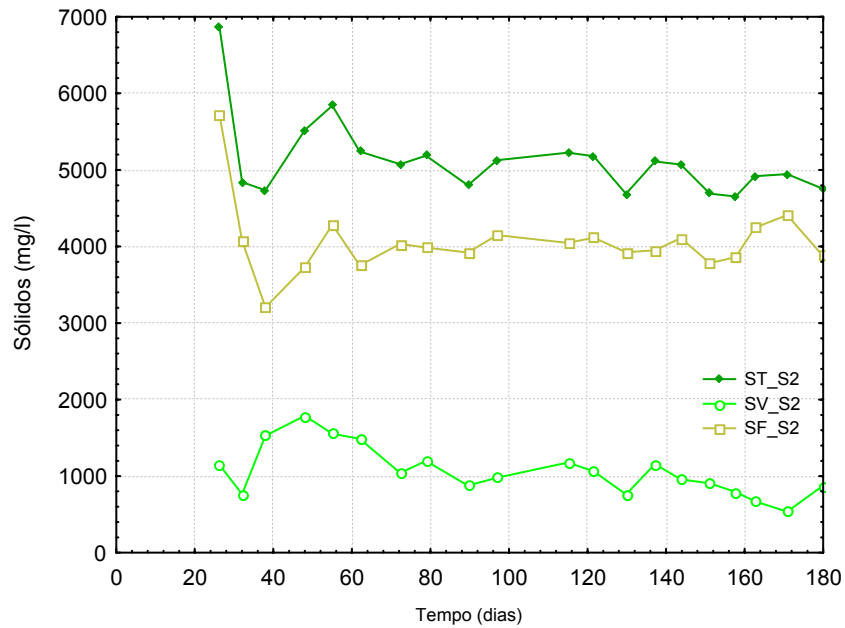


Figura 6.21 – Sólidos em função do tempo para  $h_{0t}$

O teor de sólidos fixos, para o ramo úmido, é de 23,90% e voláteis de 76,10%. O valor médio dos sólidos totais foi de 4872 mg/l. Nos 23° e 106° dia houve picos com valores mínimos dos sólidos, respectivamente, de 2960 e 3500 mg/l (Fig. 6.22).

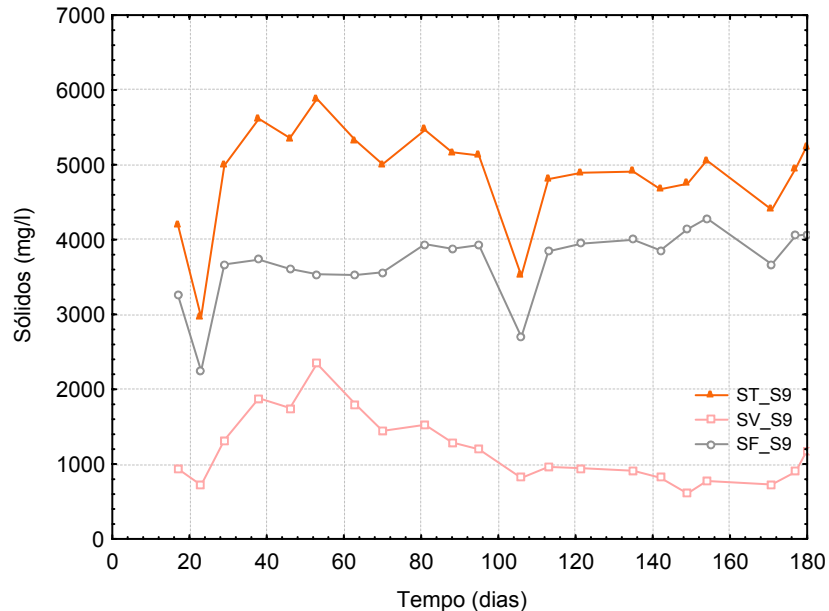


Figura 6.22 – Sólidos em função do tempo para ramo úmido

## 6.5.5 Metais

### a) Ferro

O LD do ferro no aparelho é de 0,106 mg/l. Para o líquido de entrada o valor da concentração foi de 10,86 mg/l. Observa-se na Fig. 6.23 que o valor do ferro, após o 100° dia de monitoramento, tendeu a aumentar, demonstrando a retenção do metal no início e depois a ocorrência de lixiviação.

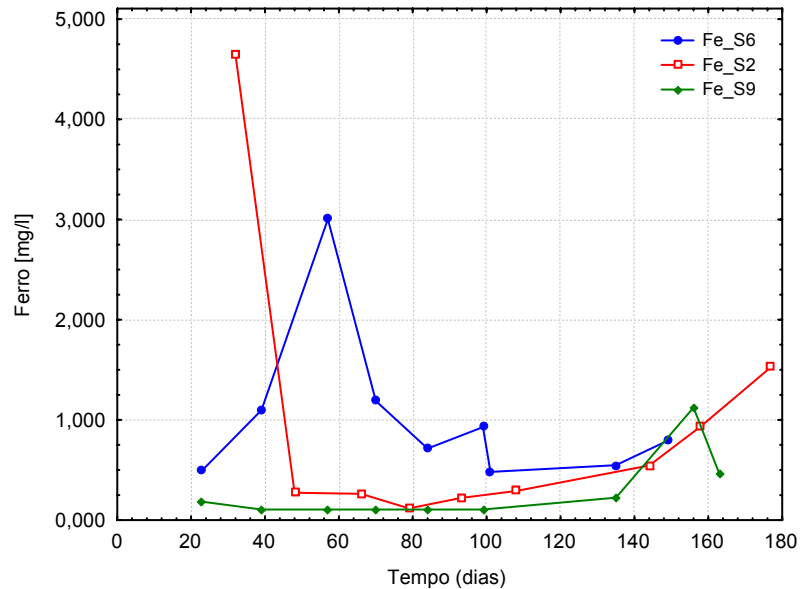


Figura 6.23 – Concentração de ferro nos permeâmetros

## b) Zinco

O Limite de Detecção do zinco é de 0,0078 mg/l, vários pontos apresentaram concentração abaixo deste valor (Fig. 6.24). Para o líquido de entrada o valor da concentração foi de 0,254 mg/l.

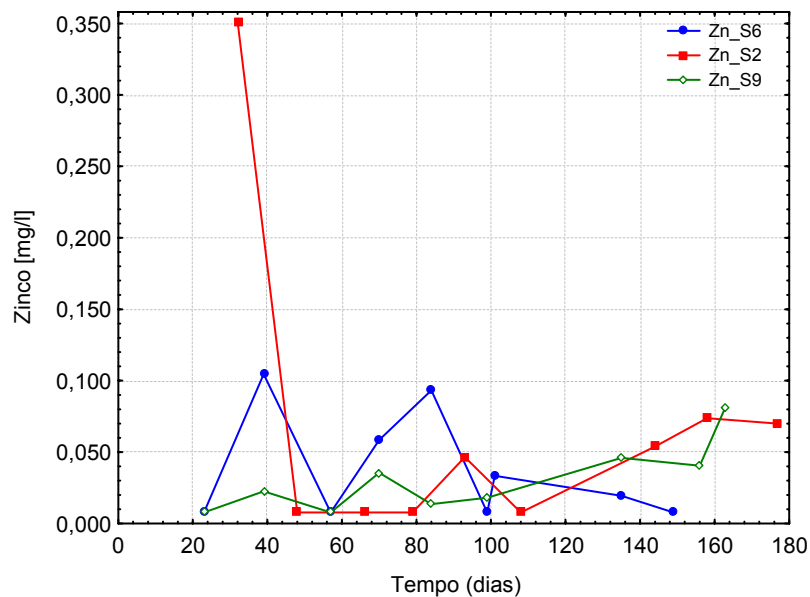


Figura 6.24 – Concentração de zinco nos permeâmetros

### c) Magnésio

O LD do Mg é de 0,004 mg/l. Para o líquido de entrada o valor da concentração foi de 75,54 mg/l. Na Tabela 6.7 observa-se a ocorrência de lixiviação do magnésio, pois os valores de saída estão maiores do que na entrada. A concentração do magnésio para esta amostra (AM2) está superior ao da AM1.

Tabela 6.7 – Concentração do magnésio

Dia	Ramo Seco	Umidade Ótima	Ramo Úmido
23	119,99		139,95
32		159,88	
84	109,88		169,85
93		159,94	
149	25,31		
163			119,94
177		150,00	

### d) Manganês

Para a entrada o valor do Mn foi 1,216 mg/l. Para as saídas, o valor máximo foi de 2,285 mg/l para a hot, sendo, portanto maior que na entrada. Várias amostras tiveram concentração menor que o LD (0,085 mg/l) (Fig. 6.25).

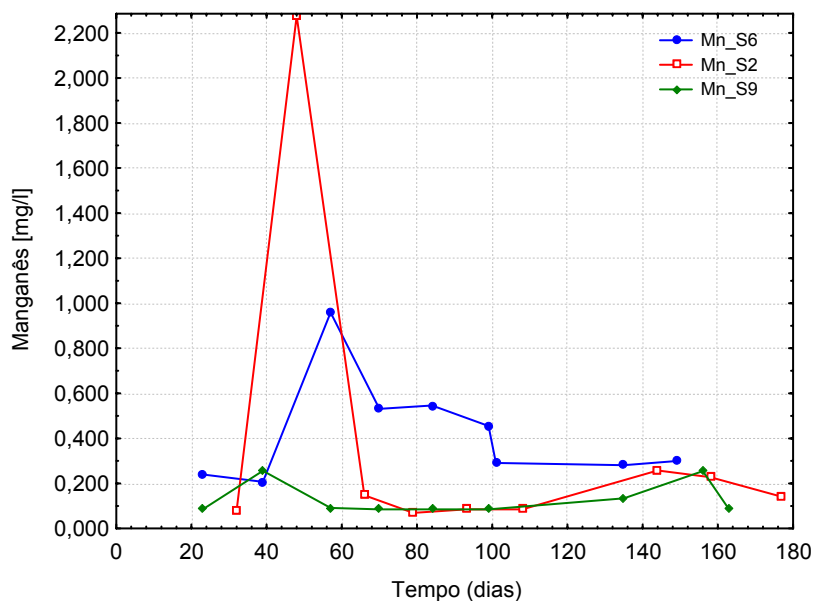


Figura 6.25 – Concentração de manganês nos permeâmetros

### e) Cálcio

O LD do cálcio é de 0,029 mg/l. Vários pontos apresentaram concentração maior do que para a entrada (6,04 mg/l), demonstrando a lixiviação do metal (Fig. 6.26).

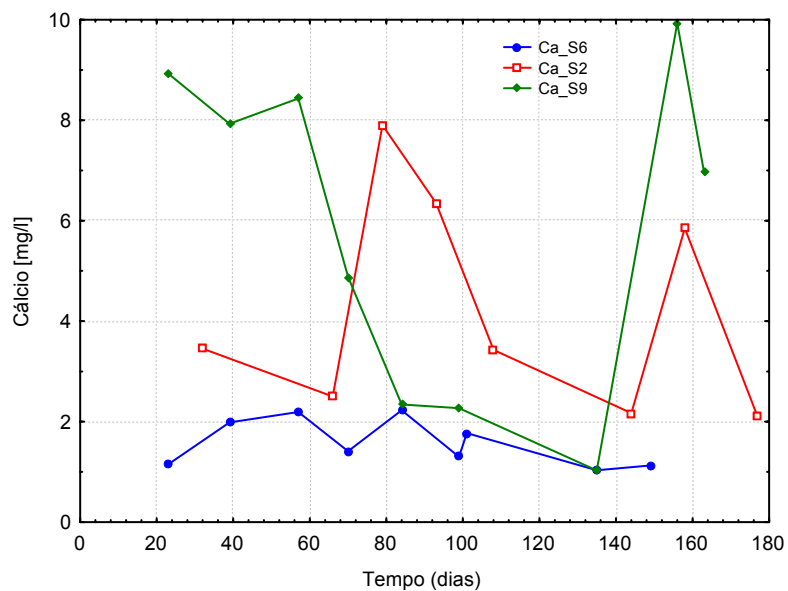


Figura 6.26 – Concentração de cálcio nos permeômetros



## 7 RESULTADOS DA AM3

A amostra AM3 é utilizada para a camada de cobertura do aterro sanitário de Chapecó.

### 7.1 Classificação do solo

A amostra do aterro sanitário de Chapecó, utilizada para a camada de cobertura é classificada como um solo silte-argiloso, apresentando 60,67 % de silte, 21,98 % de argila e 17,34 % de areia (Fig. 7.1).

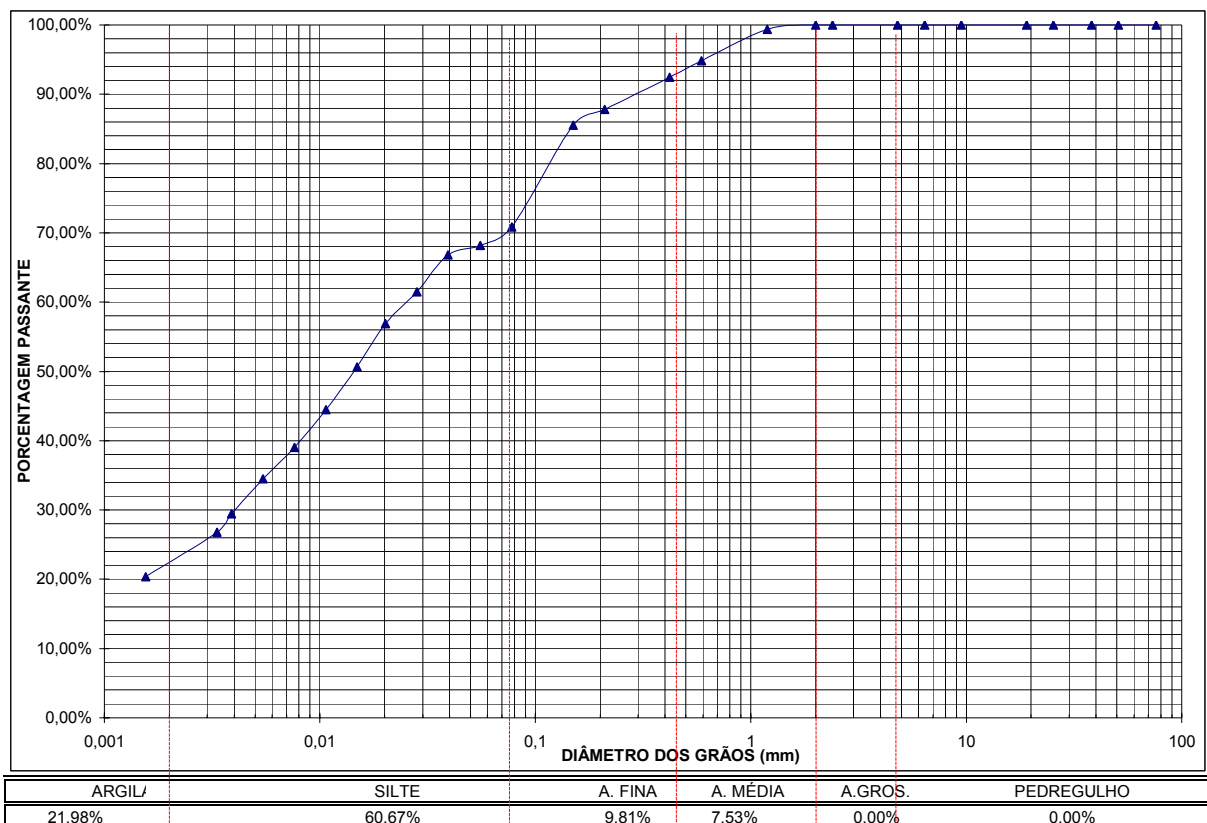


Figura 7.1 – Curva granulométrica da AM1

A massa específica dos grãos do solo é de 2,319 g/cm<sup>3</sup>. Os limites de Atterberg determinados são: LL = 56 % e LP = 45 %. O índice de plasticidade (IP) é de 11 %, sendo classificado como medianamente plástico.

A umidade ótima obtida pelo ensaio de compactação foi de 32,10 % e a massa específica aparente máxima do solo seco foi de 1,35 g/cm<sup>3</sup>. A curva de compactação está apresentada na Fig. 7.2.

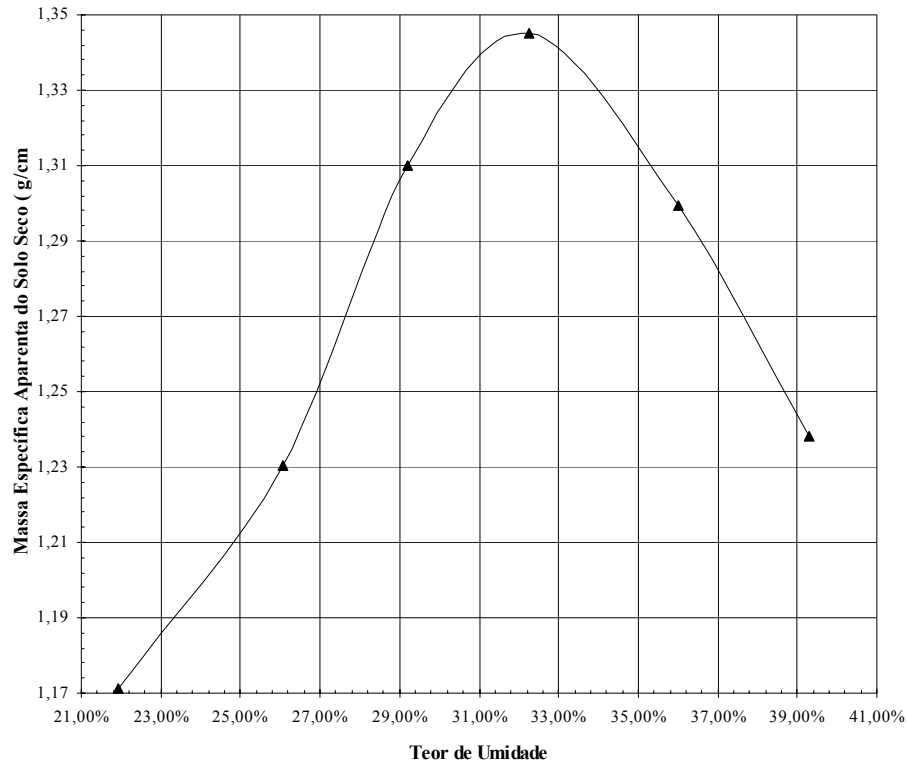


Figura 7.2 – Curva de compactação

Para a AM3 o ensaio de permeabilidade foi realizado apenas com água, pois este solo é usado para a camada de cobertura do aterro sanitário. A umidade de compactação obtida foi de 30,35 %, a massa específica de 1,360 g/cm<sup>3</sup>, o grau de compactação 101,12 %. O índice de vazios da amostra compactada é de 0,71 e a porosidade de 41,35 %.

## 7.2 Ensaio de permeabilidade

A Fig. 7.3 mostra a variação do coeficiente de permeabilidade em função do tempo (180 dias). Observa-se que a permeabilidade do solo diminuiu durante o período de monitoramento, sendo inicialmente em torno de  $2,7 \cdot 10^{-5}$  cm/s e em 180 dias em torno de  $1,45 \cdot 10^{-6}$  cm/s, diminuindo quase 10 vezes. Isto pode estar ocorrendo devido a colmatação dos vazios, o que a princípio não era esperado, pois o solo apresentou grande quantidades de raízes. Porém, observa-se que este solo

apresenta permeabilidade maior que  $10^{-7}$  cm/s, não atingindo o valor especificado pela norma (APÊNDICE D).

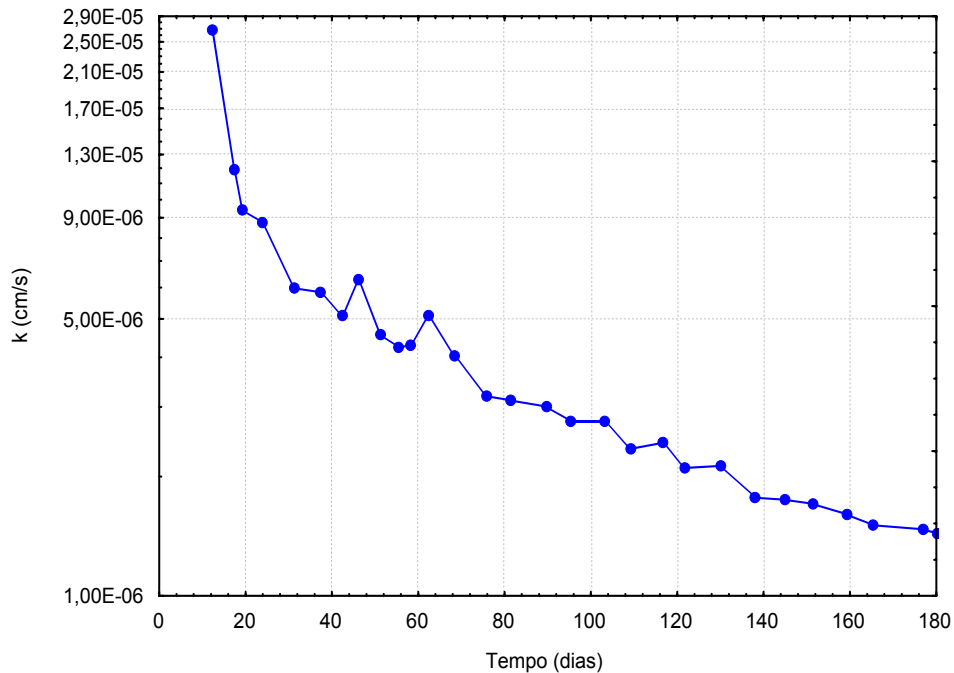


Figura 7.3 – Coeficiente de permeabilidade em função do tempo (S10)

### 7.3 Análises químicas

Alguns dos resultados das análises químicas estão apresentados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Resultados da análise química dos solos

Determinação	AM3
pH	4,80
Matéria orgânica [%]	4,40
CTC [cmol <sub>c</sub> /l]	26,76
Fósforo [mg/l]	> 50,00
Potássio [mg/l]	250,00
Alumínio [cmol <sub>c</sub> /l]	3,30
Cálcio [cmol <sub>c</sub> /l]	3,30
Magnésio [cmol <sub>c</sub> /l]	1,00
Sódio [mg/l]	13,00

O pH do solo foi baixo, classificado como ácido. Já o teor de matéria orgânica foi maior do que a dos outros solos, fato explicado pela grande quantidade de raízes existentes nas amostras. O valor da CTC também foi alto.

## 7.4 Análises micro-estruturais

Para esta amostra, por estar em contato apenas com água não foi realizada a mineralogia do solo após o monitoramento. Predominam os seguintes minerais: quartzo, caolinita, hematita e cristobalita (Fig. 7.4).

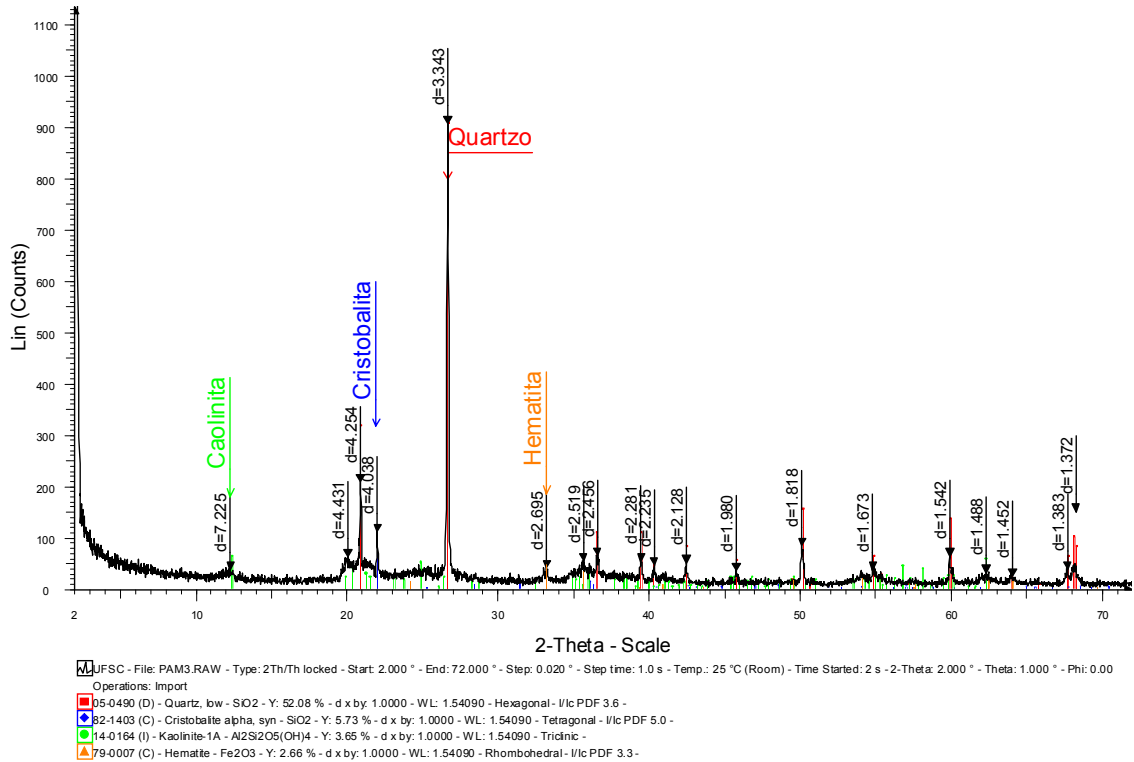


Figura 7.4 – Curva da Difração ao Raio X para a AM3

## 8 RESULTADOS DA AM4

A AM4 é a amostra do aterro sanitário de Curitiba, utilizada tanto para a impermeabilização da camada de base como de cobertura.

### 8.1 Caracterização do solo

A amostra do aterro sanitário de Curitiba, utilizada para a camada de base e cobertura é classificada como uma argila siltosa, apresentando 67,01 % de argila, 30,80 % de silte e 2,19 % de areia (Fig. 8.1).

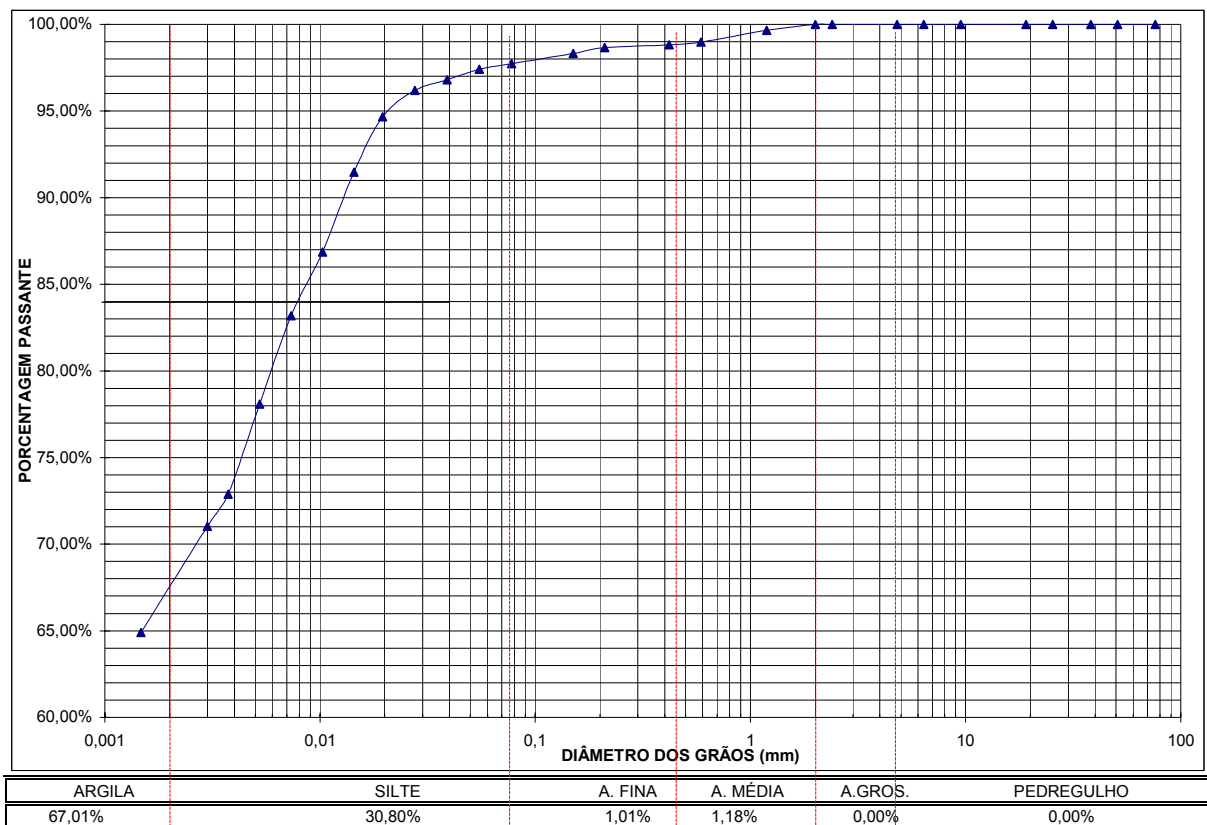


Figura 8.1 – Curva granulométrica da AM4

A massa específica dos grãos do solo é de  $2,231 \text{ g/cm}^3$ . Os limites de Atterberg determinados são:  $LL = 72 \%$  e  $LP = 65 \%$ . O índice de plasticidade (IP) é de  $7 \%$ , sendo classificado como fracamente plástico.

A umidade ótima obtida pelo ensaio de compactação foi de 31,8 % e a massa específica aparente máxima do solo seco foi de 1,445 g/cm<sup>3</sup>. A curva de compactação está apresentada na Fig. 8.2.

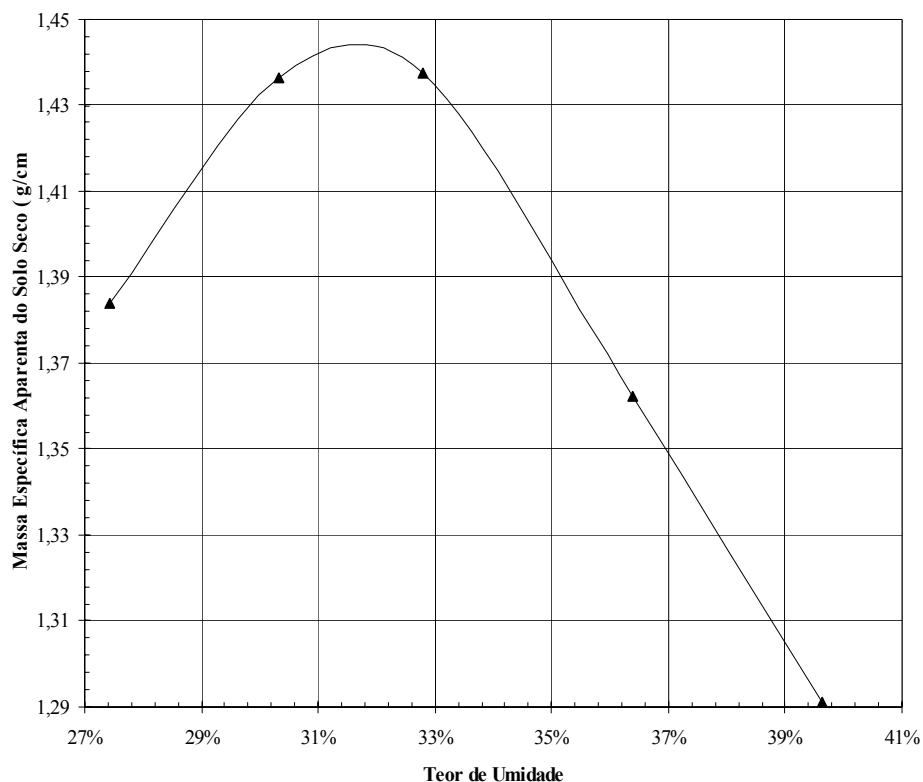


Figura 8.2 – Curva de compactação

A umidade, massa específica e grau de compactação obtido estão apresentados na Tabela 8.1. Destaca-se que o grau de compactação atingido não foi de exatamente 95 % devido às dificuldades de compactação como a obtenção da umidade exata e da massa específica.

Tabela 8.1 – Compactação da amostra AM4

Amostra	Ramo Seco (S5)	$h_{ot}$ (S3)	Ramo Úmido (S8)	hot água (S11)
Líquido	Líq.Percolado	Líq.Percolado	Líq.Percolado	Água
Umidade [%]	26,66	29,49	34,80	30,93
MEA [g/cm <sup>3</sup> ]	1,380	1,470	1,383	1,459
Grau de Compactação [%]	95,50	101,73	95,71	100,97
Índice de Vazios (e)	0,61	0,51	0,61	0,52
Porosidade (n) [%]	37,92	33,87	37,79	34,37

Na Fig. 8.3 observa-se a curva de compactação obtida para as amostras utilizadas nos permeâmetros, na umidade ótima (S3), no ramo seco (S5), no ramo úmido (S8).

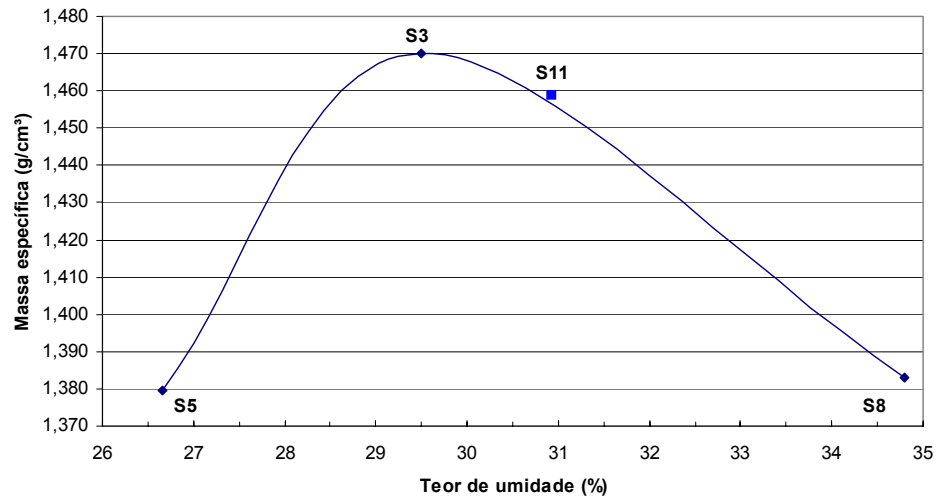


Figura 8.3 – Curva de compactação

## 8.2 Ensaio de permeabilidade

A seguir estão apresentados os resultados do monitoramento da permeabilidade para as amostras percoladas pelo líquido percolado do aterro sanitário (APÊNDICE E).

### 8.2.1 Água – Umidade Ótima

A Fig. 8.4 mostra a variação do coeficiente de permeabilidade em função do tempo (180 dias). Observa-se que o coeficiente de permeabilidade do solo variou bastante durante o período de monitoramento, com vários picos. No 30º dia o valor de  $k$  foi o mínimo ( $4,65 \cdot 10^{-8}$  cm/s), já no 58º foi máximo ( $5,38 \cdot 10^{-7}$  cm/s). No final do monitoramento o valor da permeabilidade ficou em torno de  $1,00 \cdot 10^{-7}$  cm/s. Este solo atende as recomendações da norma com relação ao coeficiente de permeabilidade.

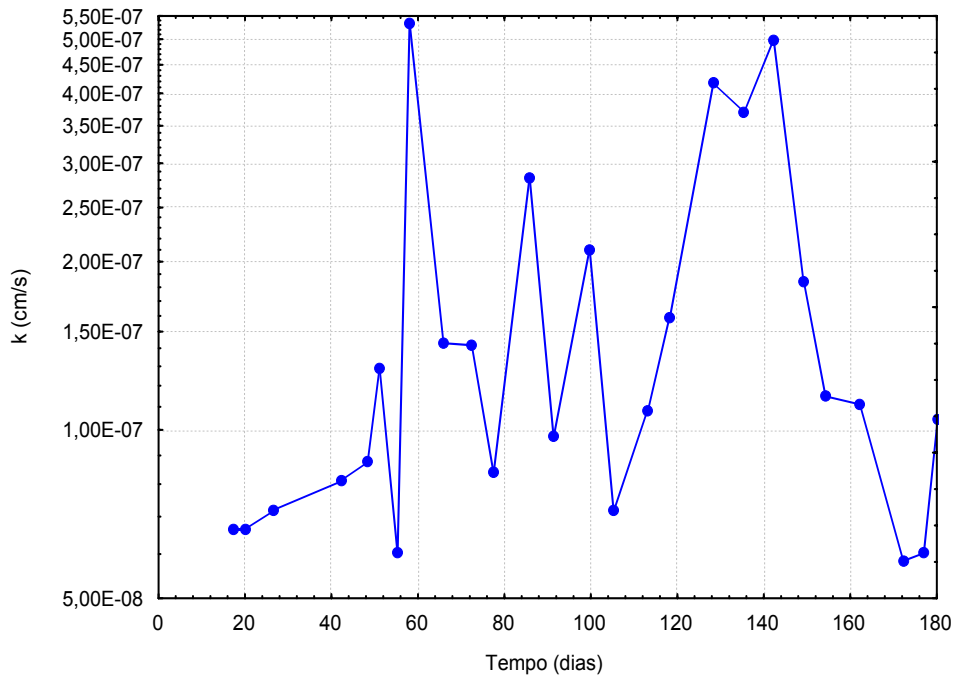


Figura 8.4 – Coeficiente de permeabilidade em função do tempo (S11)

### 8.2.2 Líquido Percolado - Ramo Seco

O valor do coeficiente de permeabilidade da amostra compactada no ramo seco (S5) durante o início do monitoramento era muito alto, passando uma quantidade muito grande de líquido pelo solo. Este fato exigiu que o registro que alimentava o permeâmetro do reservatório ficasse fechado de noite e nos períodos que não havia ninguém no laboratório para evitar vazamentos do líquido. Após certo período, 86º dia, observou-se que isto estava influenciando muito na permeabilidade do solo, então foi trocado o reservatório de coleta para deixar o líquido percolando sem interromper o fluxo. Considerando que isto foi um erro que prejudicou a análise dos dados, os dados anteriores ao 86º dia não foram considerados na análise estatística (Fig. 8.5). O que pode ter acontecido é que o solo não estava completamente saturado, ou até que, após este período, ocorreu a colmatação, diminuindo o coeficiente de permeabilidade.

Pode-se observar que após o 86º dia o valor da permeabilidade diminuiu rapidamente, aproximadamente 100 vezes.



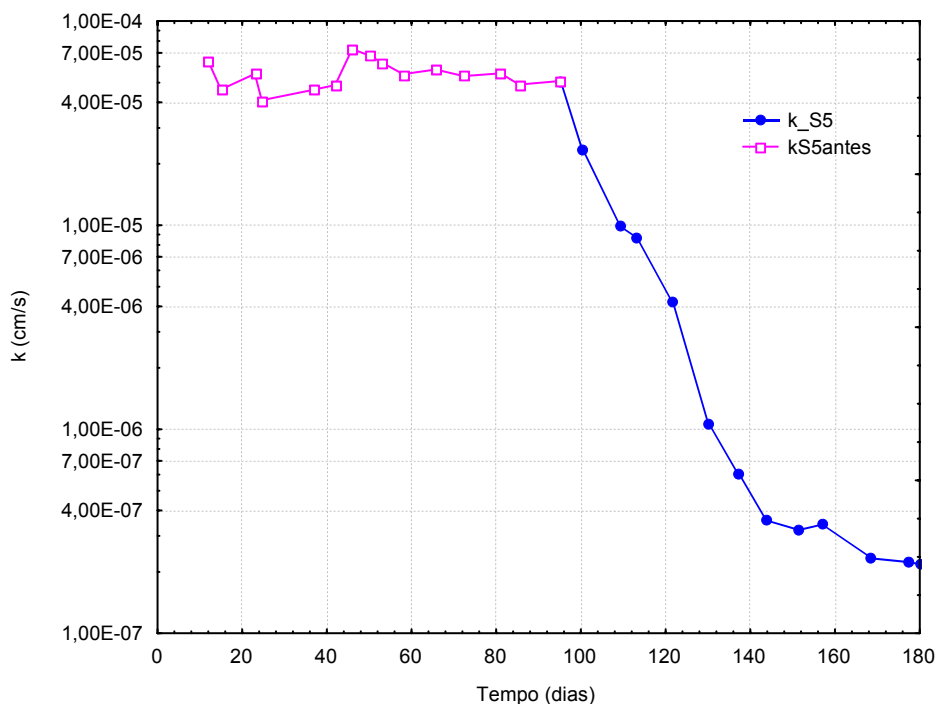


Figura 8.5 – Coeficiente de permeabilidade em função do tempo (S5)

A Fig. 8.6 mostra a variação do coeficiente de permeabilidade em função do tempo, considerando os dados após o dia 86. Observa-se que a permeabilidade do solo diminuiu durante o período de monitoramento, sendo inicialmente em torno de  $5,00 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$  e em 180 dias em torno de  $2,20 \cdot 10^{-7} \text{ cm/s}$ . Este valor ainda não tendeu a estabilizar, sendo que poderia reduzir mais ainda se o monitoramento continuasse.

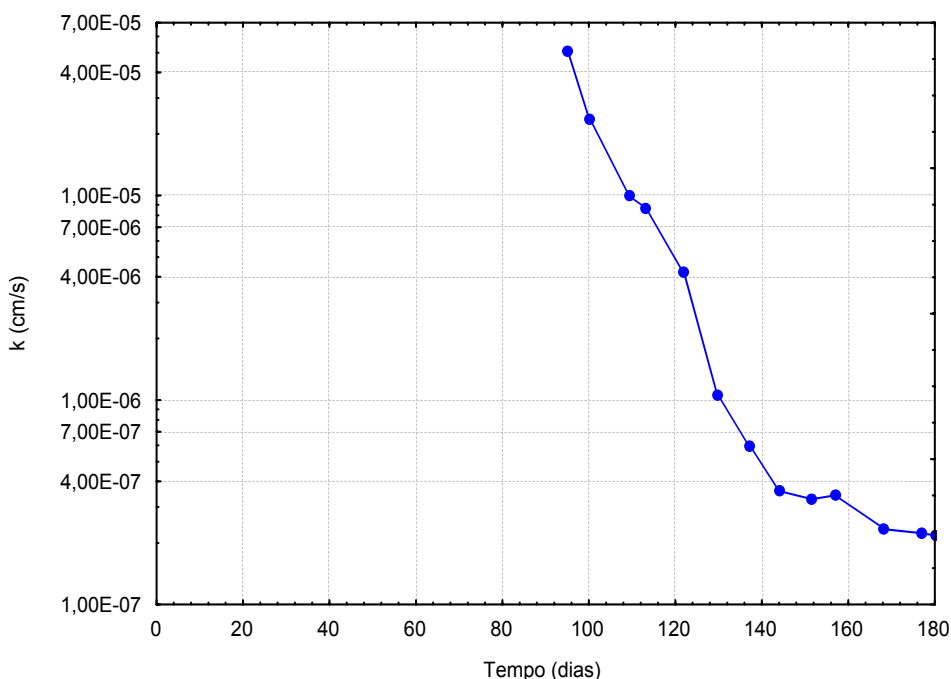


Figura 8.6 – Coeficiente de permeabilidade em função do tempo (S5)

### 8.2.3 Líquido Percolado - Umidade Ótima

A Fig. 8.7 mostra a variação do coeficiente de permeabilidade em função do tempo. Observa-se que a permeabilidade do solo foi bem baixa, com valor mínimo de  $2,70 \cdot 10^{-9}$  cm/s no 130º dia. Devido este valor muito baixo, a quantidade de líquido que percolou pelo solo por semana foi muito pequena (no máximo 20 ml), o que não permitiu realizar todas as análises previstas semanalmente. Este solo é muito adequado para a utilização como material de impermeabilização de camadas de base e cobertura.

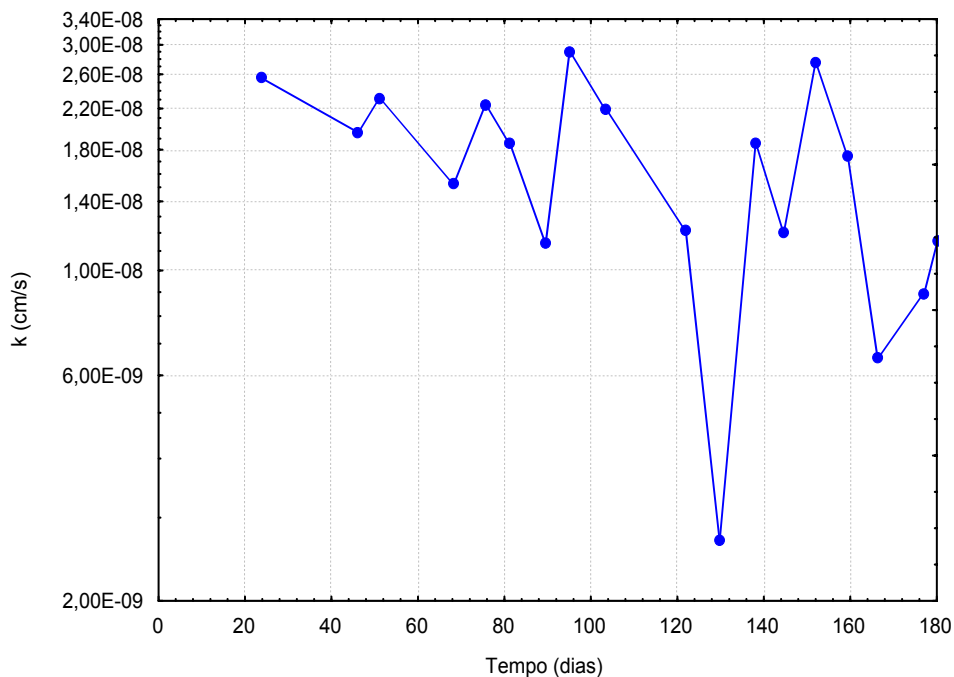


Figura 8.7 – Coeficiente de permeabilidade em função do tempo (S3)

### 8.2.4 Líquido Percolado - Ramo Úmido

A Fig. 8.8 mostra a variação do coeficiente de permeabilidade em função do tempo. O coeficiente de permeabilidade para esta amostra também variou significativamente entre os períodos de leitura, o que não foi muito satisfatório. O valor inicial da permeabilidade foi de  $1 \cdot 10^{-7}$  cm/s no 19º dia e no 180º foi de  $6 \cdot 10^{-8}$  cm/s.

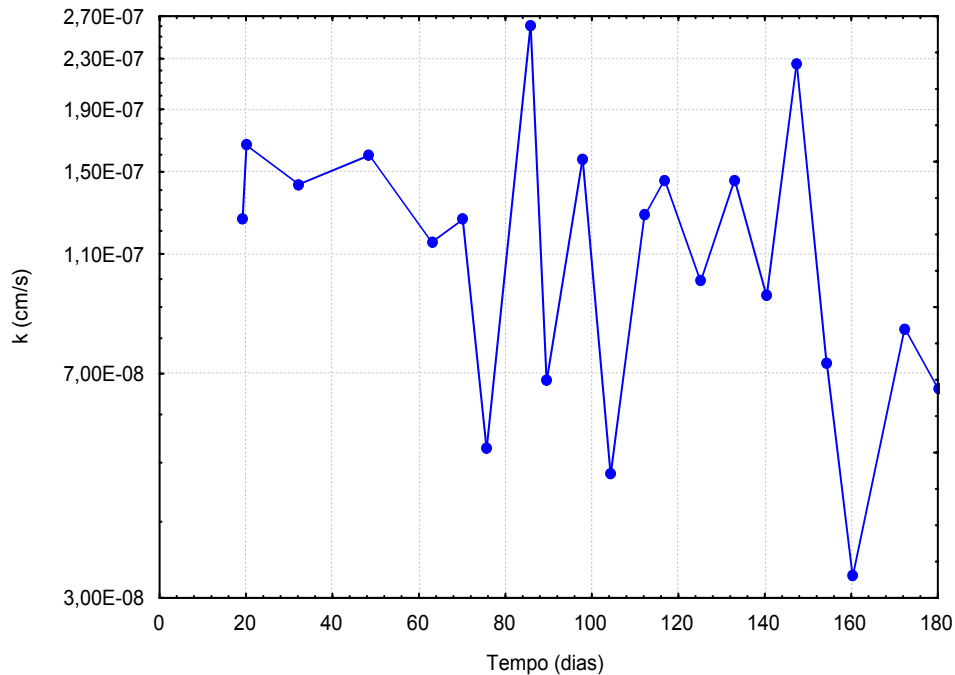


Figura 8.8 – Coeficiente de permeabilidade em função do tempo (S8)

### 8.2.5 Resumo

Na Tabela 8.2 observa-se um resumo dos valores dos coeficientes de permeabilidade encontrados para as amostras do aterro sanitário de Curitiba.

Tabela 8.2 – Resumo dos valores de permeabilidade

Período [dias]	$k_{méd}$ [cm/s]		
	Ramo Seco	$h_{ot}$	Ramo Úmido
0 a 30	-	$2,58 \cdot 10^{-8}$	$1,46 \cdot 10^{-7}$
31 a 60	-	$2,14 \cdot 10^{-8}$	$1,52 \cdot 10^{-7}$
61 a 90	-	$1,70 \cdot 10^{-8}$	$1,25 \cdot 10^{-7}$
91 a 120	$2,33 \cdot 10^{-5}$	$2,56 \cdot 10^{-8}$	$1,20 \cdot 10^{-7}$
121 a 150	$1,57 \cdot 10^{-6}$	$1,14 \cdot 10^{-8}$	$1,42 \cdot 10^{-7}$
151 a 180	$2,71 \cdot 10^{-7}$	$1,44 \cdot 10^{-8}$	$6,39 \cdot 10^{-8}$

Na Figura 8.9 observa-se a variação da permeabilidade média para o ramo seco, umidade ótima e ramo úmido. Observa-se que os valores tenderam a diminuir no decorrer dos meses para cada permeômetro, sendo os menores valores encontrados para a umidade ótima.

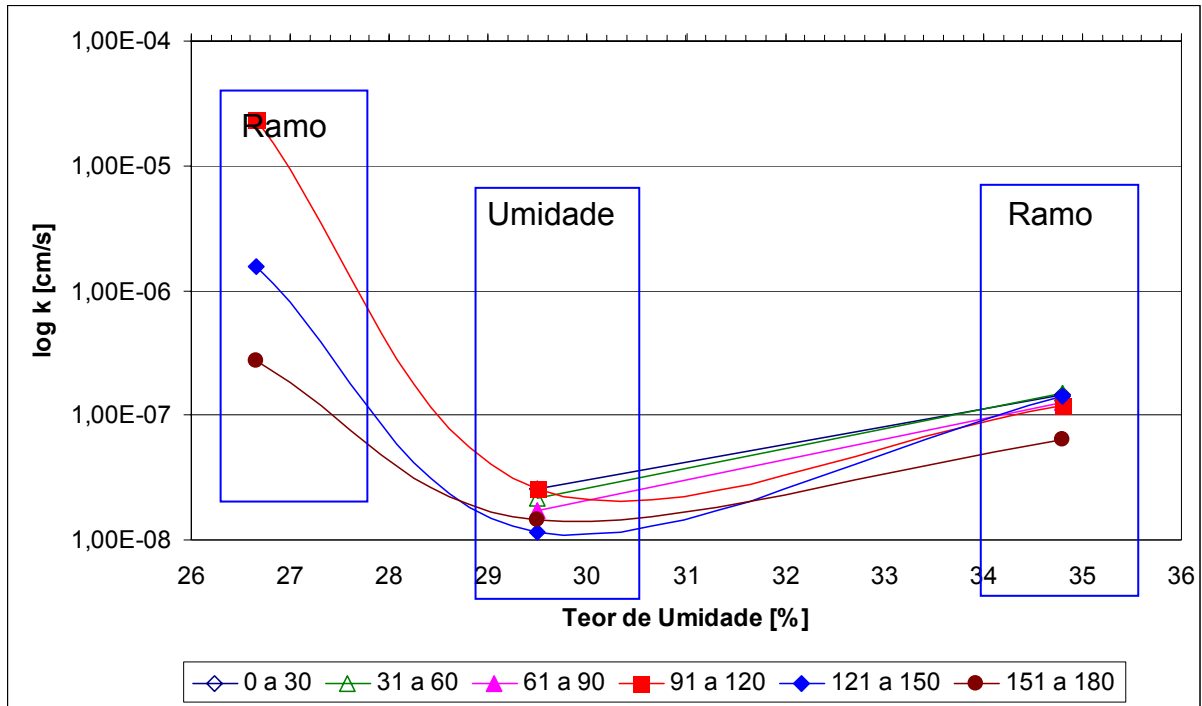


Figura 8.9 – Variação da permeabilidade média para as diferentes amostras compactadas

### 8.3 Análises químicas

Os resultados da análise química do solo estão apresentados na Tabela 8.3.

Tabela 8.3 - Resultados da análise química dos solos

Determinação	Amostra natural	Ramo Seco S5	Umidade Ótima – S3	Ramo Úmido – S8
pH	5,00	9,10	7,00	7,70
Matéria orgânica [%]	2,00	1,90	0,80	1,00
CTC [cmol <sub>e</sub> /l]	10,24	13,32	5,20	6,52
Fósforo [mg/l]	3,60	30,60	5,50	3,00
Potássio [mg/l]	13,00	1386,00	463,00	983,00
Cálcio [cmol <sub>e</sub> /l]	1,10	3,30	0,90	0,50
Magnésio [cmol <sub>e</sub> /l]	0,40	3,30	0,50	0,50
Sódio [mg/l]	3,00	609,00	276,00	394,00

Observa-se que o valor do pH, como nos demais solos em estudo apresentou seu valor alterado devido o contato com o líquido percolado. Para o ramo seco o valor foi o maior de todos os solos.

O valor da matéria orgânica diminuiu após o contato com o líquido, fato não explicado, podendo ter ocorrido algum erro de ensaio. Conforme já descrito, os solos argilosos apresentam maior teor de matéria orgânica, por isso, o ideal seria repetir os ensaios.

O valor da CTC foi médio para todas as amostras, com exceção do ramo seco que apresentou alto. Para as amostras analisadas, o solo reteve potássio, magnésio e sódio.

#### 8.4 Análises micro-estruturais

Através da mineralogia total do solo, antes do contato com o líquido percolado, observaram-se a predominância dos seguintes minerais: quartzo, caolinita e magnetita (Fig. 8.10).

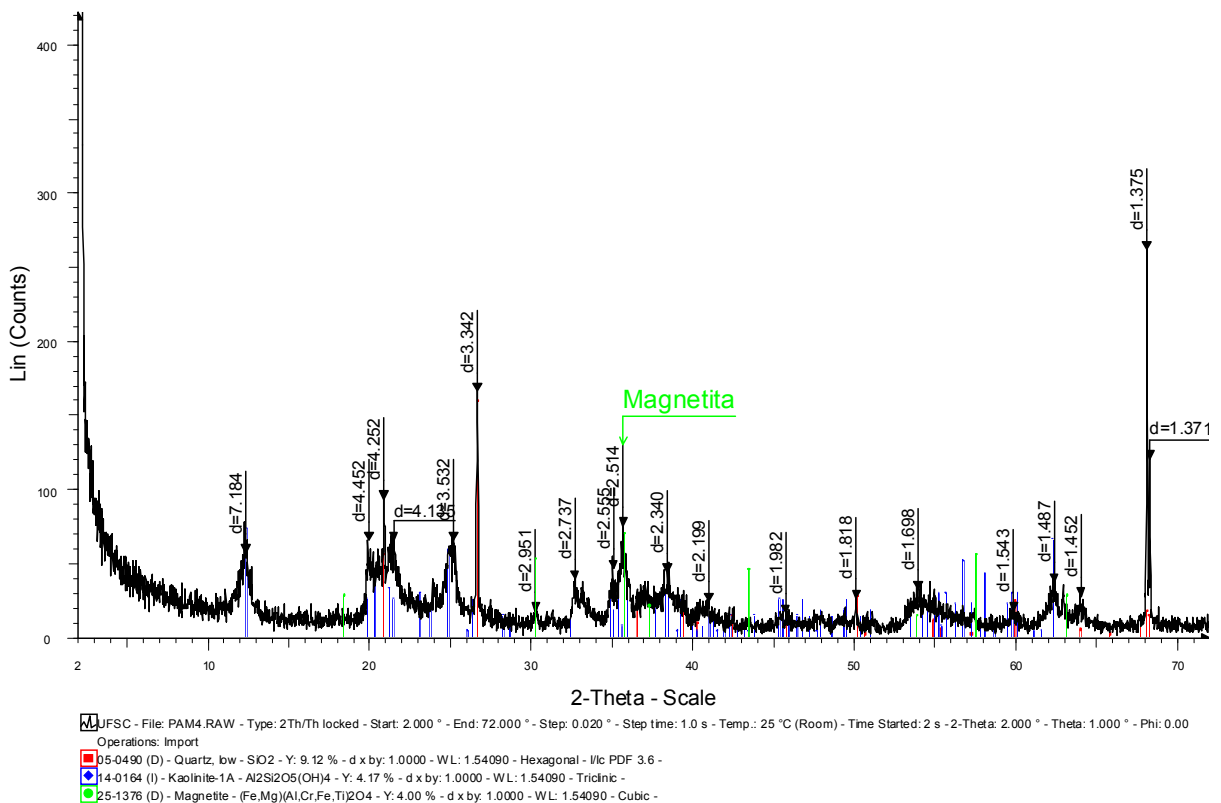


Figura 8.10 - Curva da difratometria de raios X antes da percolação

Após o contato com o líquido percolado, os minerais encontrados foram: quartzo, caolinita, hematita e augite. Observa-se a presença do quartzo e caolinita durante o

monitoramento. Sendo que após o contato com o líquido, notam-se os seguintes minerais: hematita e augite.

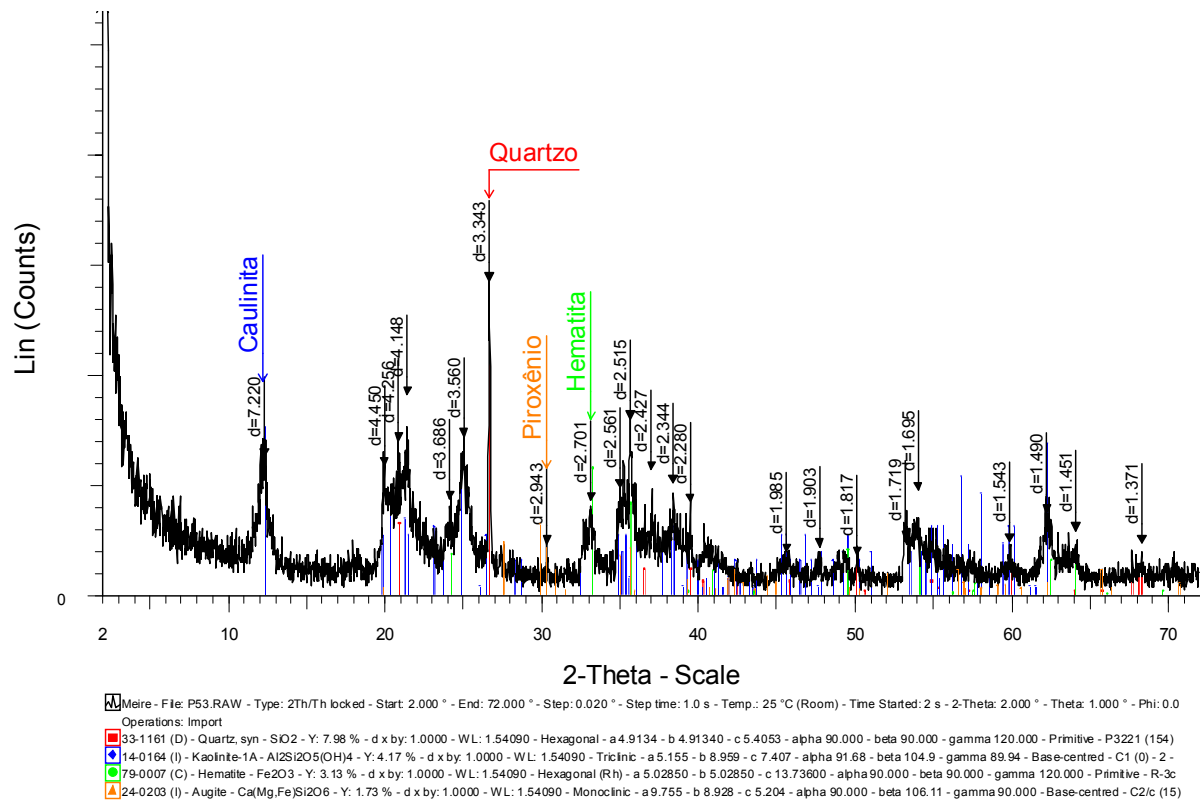


Figura 8.11 - Curva da difratometria de raios X após a percolação

## 8.5 Análises com o líquido percolado

O líquido foi coletado na entrada (S0), na umidade ótima (S3), no ramo seco (S5) e no ramo úmido (S8) (Fig. 8.12). A amostra S3 apresentou uma cor clara, parecida com água. Já a amostra S5 apresentou coloração escura, porém um pouco mais clara que a da entrada. Para a amostra S5 foram considerados todos os dados obtidos, mesmo os coletados enquanto o registro não ficou diariamente aberto.



Figura 8.12 - Amostras que percolaram o solo de Timbó

### 8.5.1 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

Com relação às amostras compactadas, observou-se que o solo compactado na umidade ótima (S3) apresentou o menor valor de DQO (Tabela 8.4).

Tabela 8.4 – Estatística Descritiva da DQO

DQO	S0	S5	S3	S8
<b>N</b>	25	22	13	19
<b>Média [mg/l]</b>	1768,52	1588,27	781,32	1046,36
<b>Mínimo [mg/l]</b>	1370,65	932,65	121,25	602,20
<b>Máximo [mg/l]</b>	3034,15	2784,45	2275,95	1575,45
<b>Desvio Padrão</b>	322,10	416,72	615,49	220,71

Na Fig. 8.13 observa-se a variação da DQO com o tempo para o líquido da entrada do sistema e para a saída no ramo seco (S5). Observa-se que o valor médio da entrada foi de 1768 mg/l enquanto que na saída foi de 1588 mg/l, observando-se que praticamente este valor não variou. Até o 72° dia o valor da DQO variou significativamente, com pico mínimo no 69° e máximo no 27° dia. Após o 72° dia o valor da DQO tendeu a acompanhar o valor do líquido de entrada.

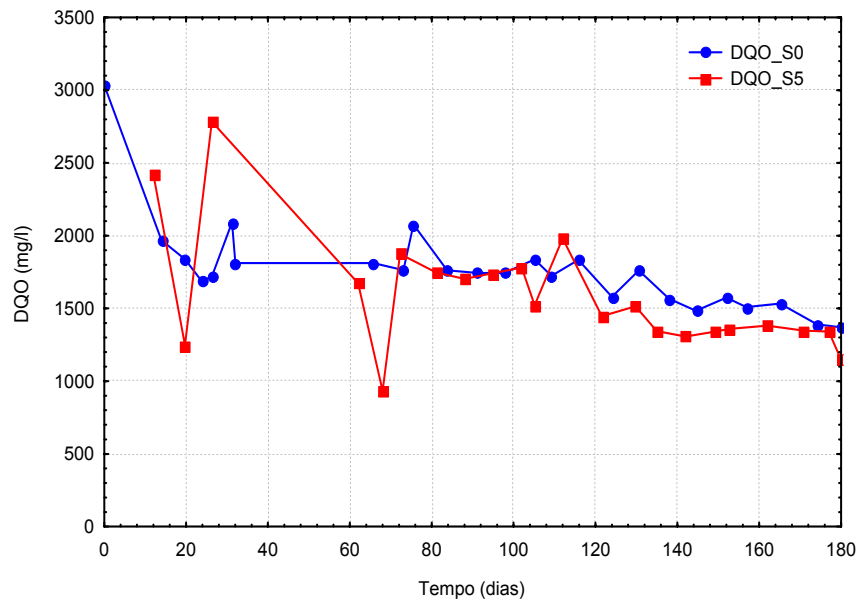


Figura 8.13 – Gráfico da DQO em função do tempo para ramo seco

O valor médio para a umidade ótima foi de 780 mg/l. Este grau de compactação permitiu uma melhor filtração do líquido retendo mais impurezas. Após o 60° dia de monitoramento, o valor da DQO na saída foi de 1100 mg/l, enquanto na entrada foi de 1800 mg/l. Após o 97° o valor da DQO permaneceu abaixo de 1000 mg/l na saída (Fig. 8.14).

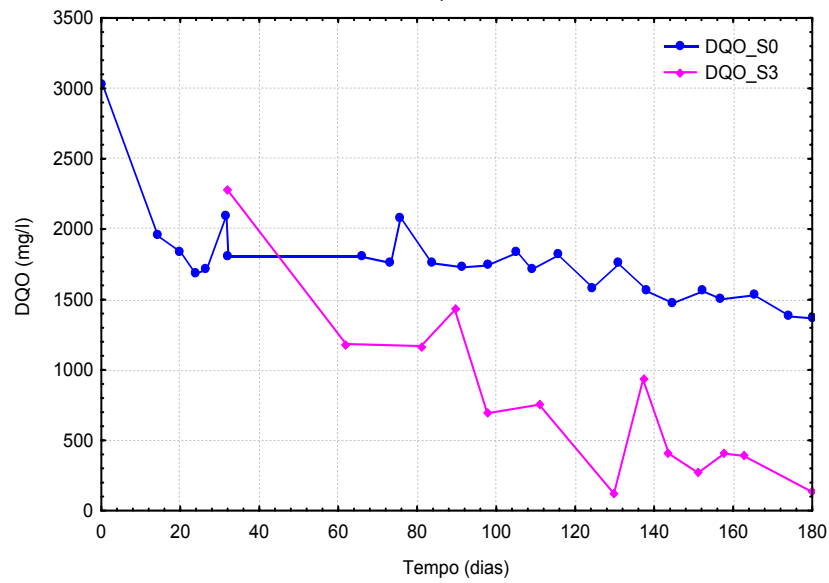


Figura 8.14 – DQO em função do tempo para  $h_{ot}$

Na Figura 8.15 verifica-se a variação da DQO para a amostra compactada no ramo úmido. O valor também foi baixo, em torno de 1000 mg/l.

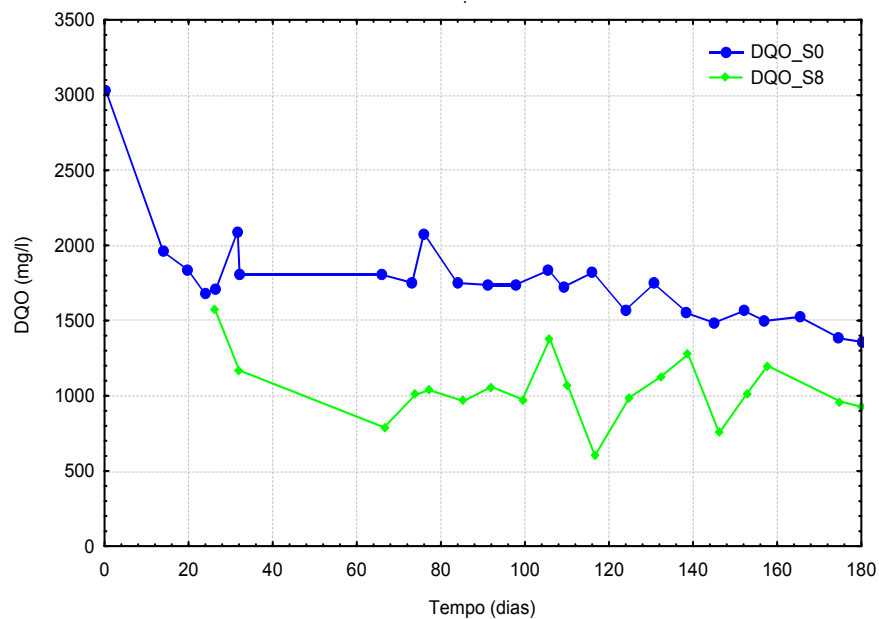


Figura 8.15 – DQO em função do tempo para ramo úmido

### 8.5.2 Carbono Orgânico Total (COT)

A Tabela 8.5 apresenta os valores do COT, observando-se que o menor valor da média do COT foi para a amostra compactada na umidade ótima.



Tabela 8.5 – Estatística Descritiva do COT

COT	S0	S5	S3	S8
<b>N</b>	27	24	13	21
<b>Média [mg/l]</b>	546,40	484,15	278,75	325,15
<b>Mínimo [mg/l]</b>	276,50	292,60	105,70	158,30
<b>Máximo [mg/l]</b>	894,30	696,70	622,20	575,00
<b>Desvio Padrão</b>	152,85	107,06	175,87	102,20

Na Fig. 8.16 observa-se a variação do COT com o tempo para o líquido da entrada do sistema e para a saída no ramo seco. O valor médio da entrada foi de 546 mg/l enquanto que na saída foi de 484 mg/l. Observa-se uma relação entre os picos de entrada e saída, sendo que quando um aumenta o outro também o acompanha.

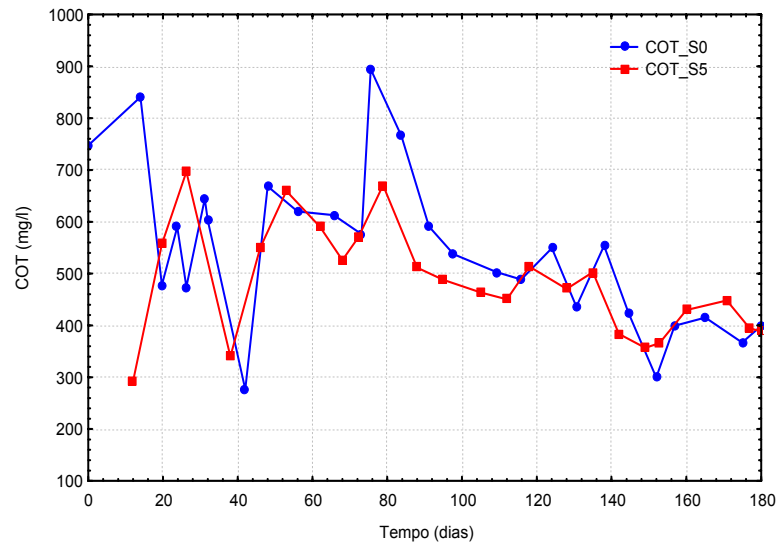
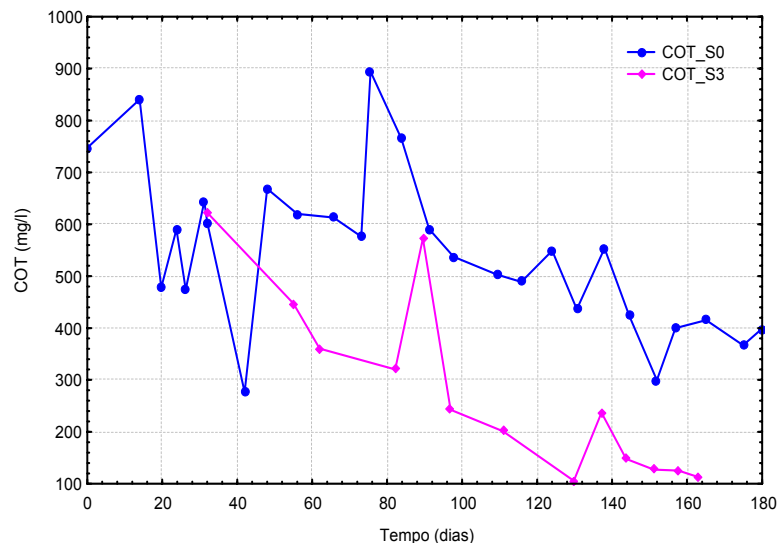


Figura 8.16 – COT em função do tempo para ramo seco

O valor médio para a saída na unidade ótima foi de 279 mg/l. No 76º dia ocorreu o pico máximo para o líquido da entrada, enquanto na saída foi no 89º (Fig.8.17).

Figura 8.17 – COT em função do tempo para  $h_{ot}$

O valor do COT para a saída no ramo úmido foi de 325 mg/l (Fig. 8.18).

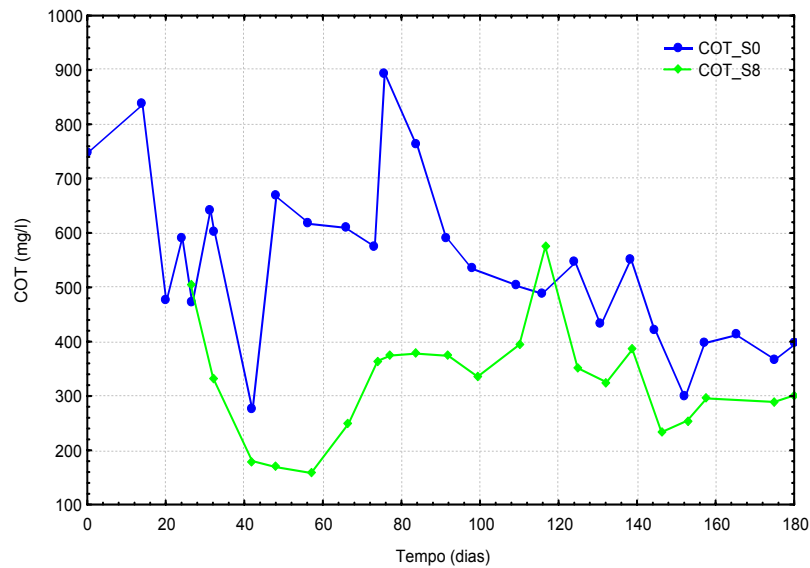


Figura 8.18 – COT em função do tempo para ramo úmido

### 8.5.3 pH

O valor médio do pH encontrado para as amostras classifica o líquido percolado como básico, sendo apenas para a hot como neutro (Tabela 8.6).

Tabela 8.6 – Estatística Descritiva do pH

pH	S0	S5	S3	S8
<b>N</b>	27	24	12	21
<b>Média [mg/l]</b>	8,68	8,60	6,97	8,20
<b>Mínimo [mg/l]</b>	8,25	8,30	6,33	7,44
<b>Máximo [mg/l]</b>	9,09	8,95	8,71	8,78
<b>Desvio Padrão</b>	0,20	0,17	0,82	0,30

Nas Figuras 8.19 a 8.21 observa-se a variação do pH com o tempo para o líquido da entrada do sistema e para as saídas. O pH da amostra no ramo seco permaneceu bem próximo do valor da entrada.

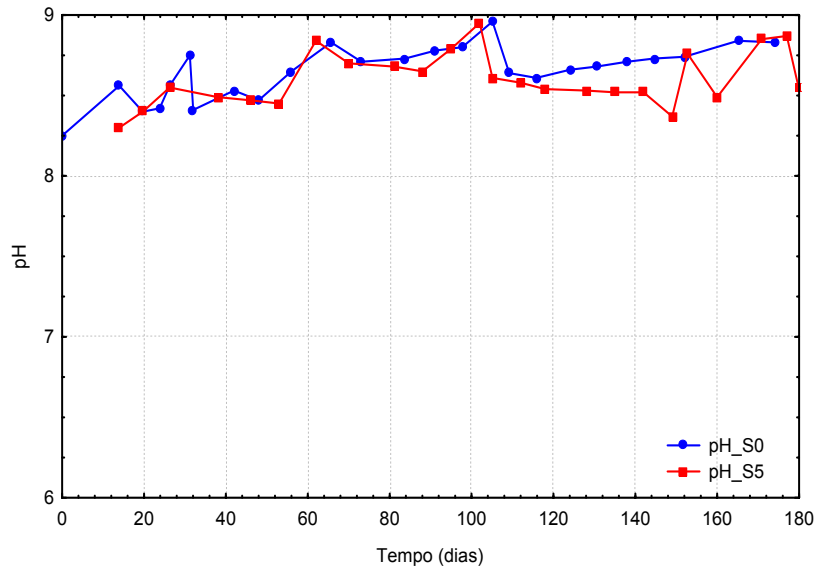


Figura 8.19 – pH em função do tempo para ramo seco

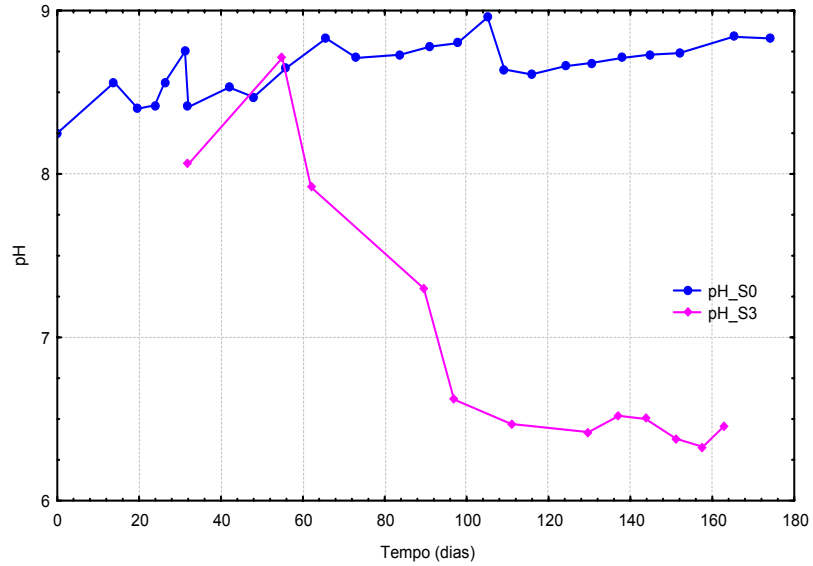


Figura 8.20 – pH em função do tempo para h<sub>ot</sub>

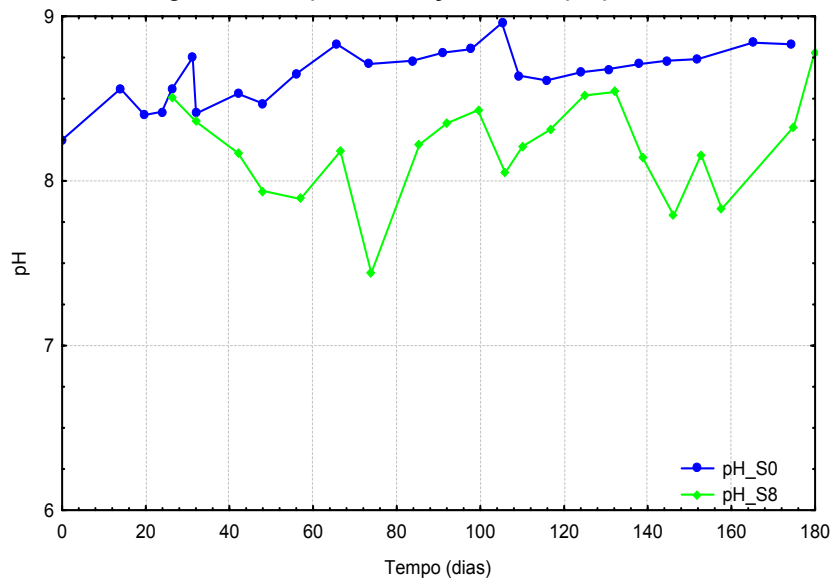


Figura 8.21 – pH em função do tempo para ramo úmido

### 8.5.4 Sólidos Totais, Fixos e Voláteis

O valor médio dos sólidos totais no ramo seco foi de 6808 mg/l (Figura 8.22). O teor de sólidos voláteis foi igual a 13,77% e os sólidos fixos igual a 86,23%.

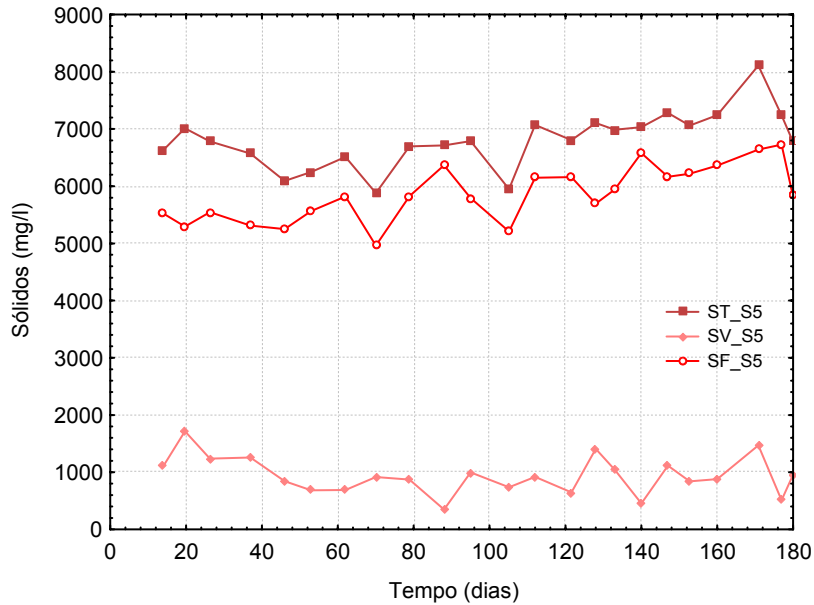


Figura 8.22 – Sólidos em função do tempo para ramo seco

O teor de sólidos voláteis para a  $h_{ot}$  foi igual a 24,39% e os sólidos fixos igual a 75,61%. O valor médio dos sólidos totais foi de 2517 mg/l (Fig. 8.23). Devido à baixa permeabilidade do solo, poucos foram os pontos coletados para as análises desta amostra.

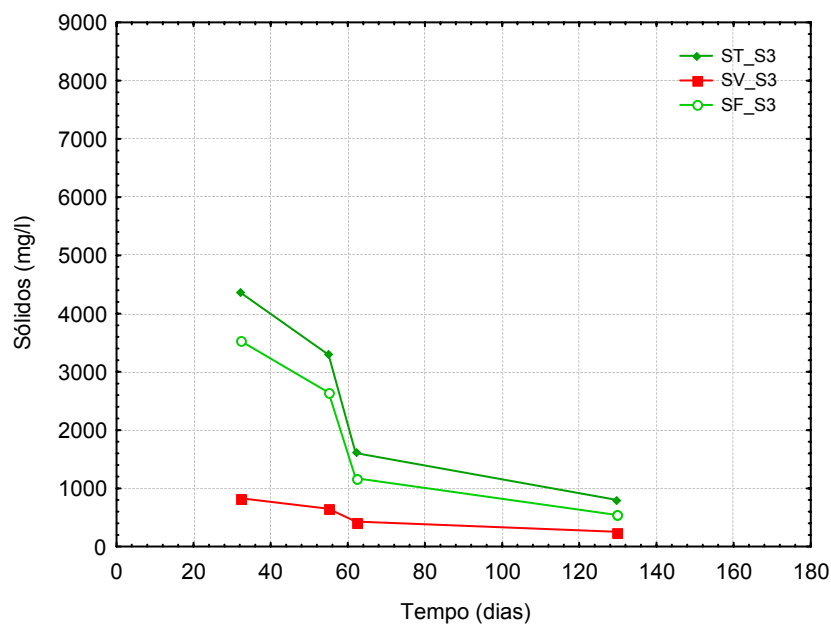


Figura 8.23 – Sólidos em função do tempo para  $h_{ot}$

O teor dos sólidos fixos para o ramo úmido foi de 87,46 % e para os voláteis foi de 12,54%. O valor médio dos sólidos totais foi igual a 4515 mg/l (Fig. 8.24).

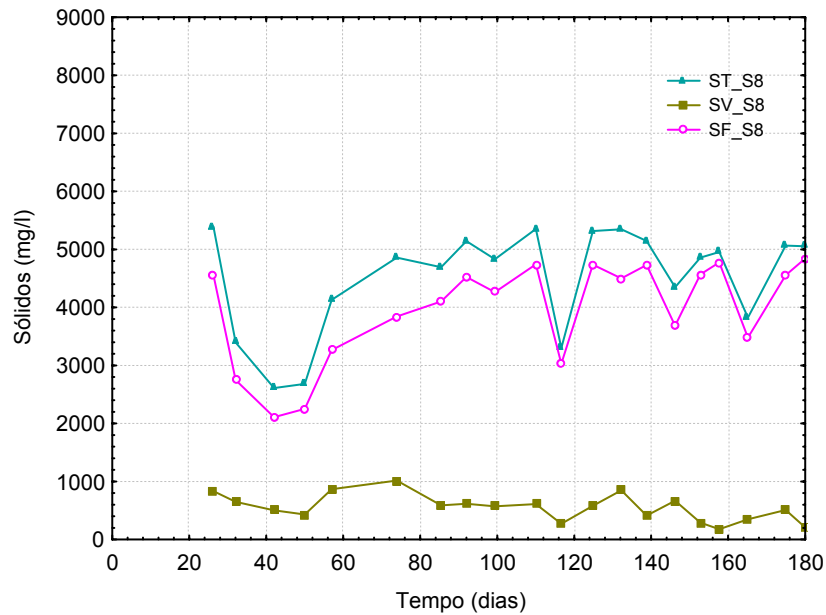


Figura 8.24 – Sólidos em função do tempo para ramo úmido

### 8.5.5 Metais

Para a amostra compactada na umidade ótima, devido à baixa permeabilidade do solo, apenas dois pontos foram analisados durante o monitoramento, não sendo significativos para a análise dos metais.

#### a) Ferro

O Limite de Detecção do ferro é de 0,106 mg/l. Para o líquido de entrada o valor da concentração foi de 10,86 mg/l. Observa-se retenção do metal pelo solo para o ramo seco. Para a umidade ótima observa-se um valor bem superior ao da entrada, conduzindo a lixiviação do metal pelo solo. Após o 100º dia, ocorreu lixiviação dos metais para o ramo úmido, com concentração superior à entrada (Fig. 8.25).

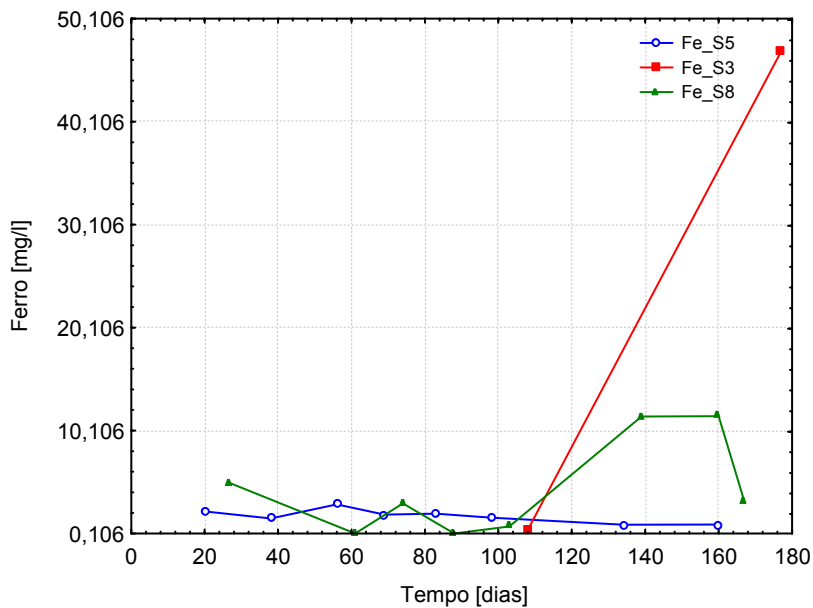


Figura 8.25 – Concentração de ferro nos permeâmetros

## b) Zinco

Para o líquido de entrada o valor da concentração foi de 0,254 mg/l. Observa-se que para o ramo úmido, vários pontos ficaram com concentração menor que o LD (0,0078 mg/l), demonstrando a retenção do zinco pelo solo (Fig. 8.26).

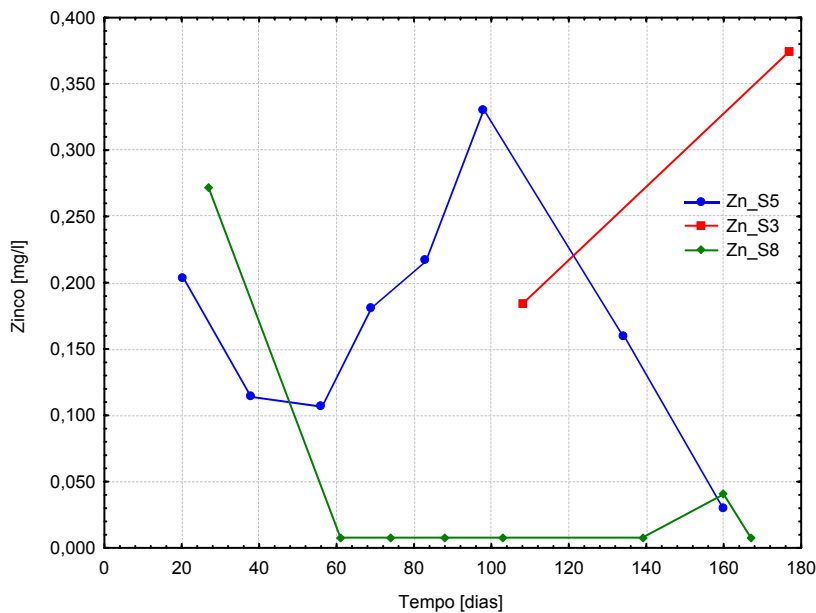


Figura 8.26 – Concentração de zinco nos permeâmetros

### c) Magnésio

O Limite de Detecção (LD) do magnésio é de 0,004 mg/l. Para o líquido de entrada o valor da concentração foi de 75,54 mg/l. Observa-se a retenção do magnésio pelo solo para o ramo úmido, evidenciando a melhor eficiência desta compactação.

Na Tabela 8.7 observa-se que para o ramo seco e umidade ótima o solo reteve, inicialmente, grande quantidade do magnésio, porém nos últimos dias do monitoramento o valor tendeu a aumentar, indicando a lixiviação.

**Tabela 8.7 – Concentração do magnésio**

<b>Dia</b>	<b>Ramo Seco</b>	<b>Umidade Ótima</b>	<b>Ramo Úmido</b>
27			91,76
38	25,79		
83	29,52		
88			19,50
108		2,023	
160	55,90		
167			7,44
177		24,15	

### d) Manganês

A concentração para a entrada foi de 1,216 mg/l. Para a amostra compactada no ramo seco a concentração para todos os pontos foi menor que o LD (0,085 mg/l). Para o ramo úmido, inicialmente pode ter ocorrido lixiviação (60° ao 80° dia), sendo que os outros dias ficaram com valor próximo ao LD (Tabela 8.8).

**Tabela 8.8 – Concentração do manganês**

<b>Dia</b>	<b>Umidade Ótima</b>	<b>Ramo Úmido</b>
27		ND
61		1,27
74		1,85
88		ND
103		ND
108	0,66	
139		ND
160		0,29
167		0,16
177	4,9	

Obs.: ND = Não Detectado

### e) Cálcio

Para o líquido de entrada o valor do cálcio foi de 6,04 mg/l, sendo que para as saídas este valor reduziu, indicando a retenção pelo solo. O LD do cálcio é de 0,029 mg/l (Fig. 8.27).

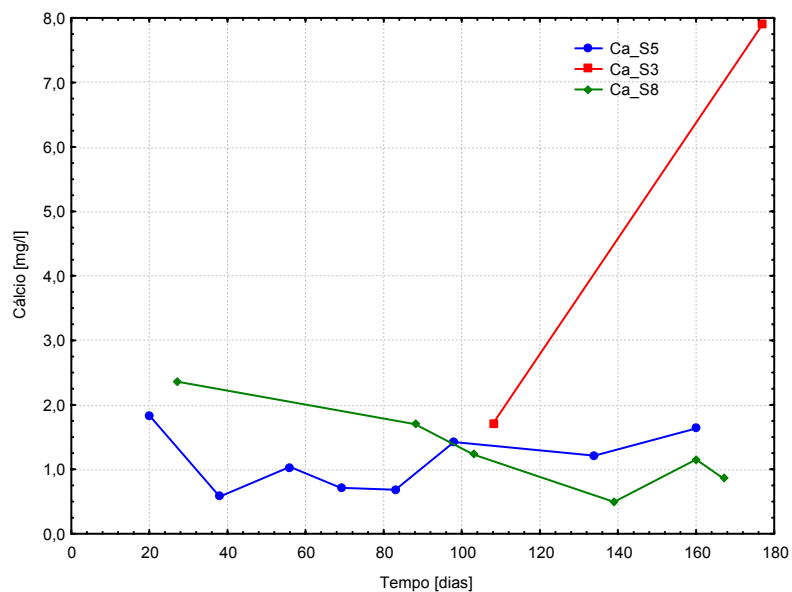


Figura 8.27 – Concentração do cálcio nos permeômetros



## 9 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste Capítulo apresenta-se a comparação dos resultados obtidos para as amostras analisadas, comparando-se os solos dos três aterros sanitários analisados.

A Tabela 9.1 apresenta uma comparação entre alguns dos resultados obtidos para os diferentes tipos de solos estudados: Timbó (AM1), Chapecó Base (AM2), Chapecó Cobertura (AM3) e Curitibaanos (AM4).

**Tabela 9.1 – Comparação entre os solos estudados**

<b>Amostra</b>	<b>Tipo de solo</b>	<b>Umidade [%]</b>	<b>GC [%]</b>	<b>k<sub>méd</sub> [cm/s]</b>
<b>AM1</b>	Ramo Seco	21,68	95,19	$4,34 \cdot 10^{-7}$
	Umidade Ótima	25,04	101,10	$3,25 \cdot 10^{-7}$
	Ramo Úmido	30,72	95,88	$2,29 \cdot 10^{-7}$
	Água	26,16	99,93	$3,18 \cdot 10^{-6}$
<b>AM2</b>	Ramo Seco	29,35	96,37	$4,05 \cdot 10^{-7}$
	Umidade Ótima	32,66	102,55	$3,81 \cdot 10^{-7}$
	Ramo Úmido	39,82	96,14	$2,23 \cdot 10^{-7}$
<b>AM3</b>	Água	30,35	101,12	$4,88 \cdot 10^{-6}$
<b>AM4</b>	Ramo Seco	26,66	95,50	$7,77 \cdot 10^{-6}$
	Umidade Ótima	29,49	101,73	$1,70 \cdot 10^{-8}$
	Ramo Úmido	34,80	95,71	$1,20 \cdot 10^{-7}$
	Água	30,93	100,97	$1,62 \cdot 10^{-7}$

Com base na Tabela 9.1 pode-se concluir que:

- As amostras compactadas no ramo úmido da curva de compactação apresentaram menor coeficiente de permeabilidade entre os solos estudados. Isto ocorre devido ao fato que, para a amostra no ramo úmido, a estrutura do solo é dispersa, deixando passar menos água do que a estrutura floclada (ramo seco).
- Entre a água e o líquido percolado do aterro sanitário, observa-se que o coeficiente de permeabilidade para o líquido percolado é menor para todas as

amostras, fato já esperado devido à colmatação dos vazios do solo pelas partículas sólidas em suspensão presentes no líquido percolado.

- A amostra AM4 é a que apresenta maior porcentagem de argila no solo e pelo fato de ser um solo mais fino apresentou menores valores do coeficiente de permeabilidade. Os solos argilosos são uma alternativa barata e eficiente para impermeabilizar as camadas superiores, laterais e de bases.
- A fase de saturação é muito importante para o ensaio de permeabilidade pois para uma amostra não saturada as bolhas de ar atrapalham a passagem de água, representando, portanto, a condição mais crítica encontrada no campo, ou seja, maior valor do coeficiente de permeabilidade.
- Com estes solos estudados observa-se que as amostras AM1 e AM3 não são recomendadas para a impermeabilização da camada de cobertura, por apresentarem, para a água, coeficiente de permeabilidade maior que  $10^{-7}$  cm/s.
- Para a impermeabilização das camadas de base os solos analisados apresentam-se adequados para a utilização nos aterros sanitários, minimizando a contaminação do lençol freático.
- O valor da permeabilidade no ramo úmido é cerca de 50 % menor do que o valor do ramo seco. Ritter et al (2000) encontrou 40 % como valor. Para a AM4 este valor é cerca de 150 % menor.

Na Tabela 9.2 observa-se a comparação dos parâmetros físico-químicos encontrados para as amostras de líquido percolado.

**Tabela 9.2 – Comparação dos parâmetros físico-químicos do líquido percolado**

<b>Amostra</b>	<b>DQO<sub>méd</sub></b> [mg/l]	<b>COT<sub>méd</sub></b> [mg/l]	<b>pH<sub>méd</sub></b>	<b>ST<sub>méd</sub></b> [mg/l]	<b>k<sub>méd</sub></b> [cm/s]
<b>Entrada</b>	1768,52	546,40	8,68	7023,92	-
<b>AM1</b>	Ramo Seco	1068,76	8,54	6175,33	$4,34 \cdot 10^{-7}$
	Umidade Ótima	1119,86	8,47	5927,89	$3,25 \cdot 10^{-7}$
	Ramo Úmido	1190,70	8,59	5828,38	$2,29 \cdot 10^{-7}$
<b>AM2</b>	Ramo Seco	1198,12	8,40	5111,83	$4,05 \cdot 10^{-7}$
	Umidade Ótima	1085,82	8,02	5123,30	$3,81 \cdot 10^{-7}$
	Ramo Úmido	905,70	8,14	4871,81	$2,23 \cdot 10^{-7}$
<b>AM4</b>	Ramo Seco	1588,27	8,60	6808,22	$7,77 \cdot 10^{-6}$
	Umidade Ótima	781,32	6,97	2517,00	$1,70 \cdot 10^{-8}$
	Ramo Úmido	1046,36	8,20	4515,60	$1,20 \cdot 10^{-7}$

Observa-se que a compactação do solo tem influência direta nos resultados, conforme já descrito por Iwai (2005). O solo compactado no ramo úmido da curva de compactação, por apresentar redução nos vazios, dificulta a passagem da matéria orgânica e de poluentes pela camada de solo, o que é visível em alguns valores encontrados para a DQO, COT, sólidos e metais.

Observou-se um significativo potencial de retenção de metais no solo. Os solos de Timbó, Chapecó Base e Curitiba nos adsorveram elevadas concentrações de sódio e potássio após o contato com o líquido percolado.

Conforme IBAM (2001), a faixa de variação do valor do pH das amostras de líquido percolado está entre 5,90 e 8,70, como pode ser verificado nos valores encontrados nas amostras analisadas nesta pesquisa. O pH das amostras de solo foi influenciado pelo pH do líquido percolante, tendendo a se igualar.

## 10 CONCLUSÕES

Através deste trabalho verifica-se a importância de estudar os solos que são utilizados como materiais para impermeabilização de aterros sanitários. Com o uso adequado do solo a sua função, estar-se-á protegendo as águas subterrâneas e os aquíferos.

Nota-se que é de extrema importância que no local a ser implantado um aterro sanitário exista um depósito natural de solo de baixa permeabilidade ( $k < 10^{-7}$  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.

Além da escolha do tipo de solo utilizado para a camada de base em aterros sanitários, deve-se atentar também para o tipo de solo utilizado na camada de cobertura, pois quanto mais impermeável for, menor será a quantidade de água que irá infiltrar nas células do aterro, e com isso, menor será o volume de líquido percolado gerado.

Neste estudo observou-se que os solos utilizados como material de impermeabilização da base nos aterros sanitários de Timbó, Chapecó e Curitiba apresentaram baixa permeabilidade, o que os torna adequados para este uso. Já os solos dos aterros sanitários de Timbó e Chapecó utilizados como material de cobertura não são recomendados por apresentarem coeficiente de permeabilidade maior que  $10^{-7}$  cm/s.

Com base nesta pesquisa, recomenda-se que as amostras, em campo, sejam compactadas no ramo úmido da curva de compactação, devido a menor permeabilidade do solo e a melhor retenção de poluentes.

Neste trabalho verificou-se que o líquido percolado contém quantidade significativa de matéria orgânica e impurezas, o que reforça a importância de utilizar um solo adequado para proteger o meio ambiente.

## **Dificuldades / Recomendações**

É necessário cuidados especiais aos ensaios de permeabilidade para solos de baixa permeabilidade devido às variações que ocorrem no nível de leitura do líquido, durante o ensaio, necessitando de estudo mais detalhado para verificar a causa destas ocorrências.

Alguns problemas operacionais foram encontrados no decorrer desta pesquisa, como a quebra de alguns registros utilizados nos permeômetros, necessitando-se da substituição das peças.

Outro problema encontrado nas realizações das análises foi a dificuldade de se obter ácido clorídrico e nítrico, utilizado para a abertura das amostras na análise dos metais, comprometendo a realização das análises.

Recomenda-se um controle rigoroso da temperatura na sala onde são realizados os ensaios de permeabilidade, pois para valores de permeabilidade muito baixos, a variação da temperatura pode afetar nos resultados de forma significativa.

Um possível trabalho a ser realizado ainda é a verificação da permeabilidade em campo nestes aterros sanitários estudados, com o controle da umidade e do grau de compactação. Com estes valores será possível realizar uma comparação entre os coeficientes de permeabilidade obtidos em campo com os de laboratório.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, M. R. M. P.; NOVAES, A. R. **Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos**. Revista Química Nova, v.25, n.6B, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8849**: Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13896**: Aterros de resíduos não perigosos: Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545**: Solo: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos: Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

BORGES, A. F.; CAMPOS, T. M. P. de; NOBRE, M. M. M. Desenvolvimento de um sistema de permeâmetros para ensaios de transporte de contaminantes em laboratório. **Solos e Rochas**: revista latino-americana de Geotecnia. (ABMS/ABGE) São Paulo, v. 20, n. 3, p. 191-207, dez. 1997.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e suas aplicações**. 6. ed. rev. Rio de Janeiro: LTC, 1988. 1 v.

CASTILHOS Jr., A. B. **Produção de Biogás e Líquidos Percolados em Aterros Sanitários**. Saneamento Ambiental. São Paulo, 1991.

CASTILHOS Jr., A. B. et al. **Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno Porte**. Programa de pesquisa em Saneamento Básico 3. Rio de Janeiro, 2003. p. 280.

COLMANETTI, J. P. **Comportamento de filtros geotêxteis em sistemas de drenagem para resíduos sólidos municipais**. 2000. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2000.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. **Guia de coleta e preservação de amostras de água** /Coord. Edmundo Garcia Agudo (et al.). São Paulo: CETESB, 1987.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. **Relatório de estabelecimento de valores orientados para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo**. CASARINI, D. C. P. et al. São Paulo: CETESB, 2001.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO URBANO DO ESTADO DA BAHIA – CONDER. **Manual de Operação de Aterros Sanitários**. Bahia: CONDER, 2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução CONAMA nº 20, de 1986**. Dispõe sobre a classificação das águas doces, salobras e salinas do Território Nacional. 1986.

COSTA, P. O. S. **Avaliação em laboratório do transporte de contaminantes no solo do Aterro Sanitário de Sauípe/Ba**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

DANIEL, D. E.; SHACKELFORD, C. D. Containment of Landfill Leachate with Clay Liners. In: CHISTENSEN, T. H.; COSSU, R.; STEGMANN, R. **Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact**. London: Academic Press, 1989.

EKLUND, A. G. **A laboratory comparison of the effects of water and waste leachate on the performance of soil liners**. Hydraulic Barriers in Soil and Rock, ASTM STP 874, A. I. Johnson, R.K. Frobels, N.J. Cavalli, and C. B. Pettersson. Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1985, pp.188-202.

EZAKI, S.; HYPOLITO, R. Avaliação da disponibilidade de íons de metais pesados associados a solos de dois aterros sanitários da região metropolitana de São Paulo – SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23, 2005, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: ABES, 2005.

FORMOSO, M. L. L. Difratometria de Raios X *in* Gomes, C. B. **Técnicas Analíticas Instrumentais Aplicadas à Geologia**, São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1984.

GOMES, L. P.; MARTINS, F. B. Projeto, Implantação e Operação de Aterros Sustentáveis de Resíduos Sólidos Urbanos para Municípios de Pequeno Porte. In: CASTILHOS JUNIOR, A. B. et al. (Org.). **Resíduos Sólidos Urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. Rio de Janeiro: RiMa/ABES, 2003.

HAMADA, J. Influência da compactação de um solo arenoso na infiltração e retenção de carga orgânica de chorume. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 3, p. 180-186, jul-set. 2004. Disponível em:

<http://www.abes-dn.org.br/publicacoes/engenharia/resaonline>. Acesso em: novembro de 2005.

HOEKS, J.; RYHINER, A. H. Surface capping with natural liner materials. In: CHISTENSEN, T. H.; COSSU, R.; STEGMANN, R. **Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact**. London: Academic Press, 1989.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL – IBAM. **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000**. IBGE: Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br> . Acesso em: janeiro de 2006.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado**. D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. (Coord.) 2. ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000.

IWAI, C. K.; HAMADA, J.; CASTILHO FILHO, G. S. Remoção da DQO do chorume através da percolação em solos empregados como material de cobertura de aterros sanitários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23, 2005, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: ABES, 2005.

JUCÁ, J. F. T. Disposição Final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 5, 2003, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ABMS, 2003.

LAMBE, T. W., WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. Massachusetts Institute of Technology, New York: 1969.

LANGE, L. C. et al. Estudo do transporte de contaminantes em meios porosos aplicado a aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos. In: CASTILHOS JUNIOR, A. B. et al. (Org.). **Alternativas de disposição de resíduos sólidos urbanos para pequenas comunidades**. Rio de Janeiro: RiMa/ABES, 2002.

LAURENTI, A., **Qualidade de Água I**. Florianópolis. Imprensa Universitária. UFSC – Florianópolis – SC, Maio de 1997.

LEITE, C. M. B.; BERNARDES, R. S.; OLIVEIRA, S. A.de. Método Walkley-Black na determinação da matéria orgânica em solos contaminados por chorume. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.8, n. 1, p. 111-115, 2004.

MAPA de Timbó. **Timbó**: Timbó Net, 2004. 1 mapa, color. Disponível em: <<http://www.timbonet.com.br/timbo.asp>>. Acesso em: 13 jan. 2005.



MONTEIRO, V. E. D.; SANTOS, E. A.; JUCÁ, J. F. T. Estudos para o dimensionamento de uma cortina de argila para contenção de contaminantes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19, 1997, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABES, 1997. p. 1721-1729.

OLIVEIRA, D. M de. **Aplicação da técnica de solidificação/estabilização para resíduos oleosos na indústria petrolífera, utilizando solo argiloso e bentonita.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas.** São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

PRIM, E. C. C. et al. Aterros Sanitários: Estudo dos mecanismos de retenção de líquidos percolados em solos argilosos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22, 2003, Joinville. **Anais...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2003.

QIAN, X.; KOERNER, R.M.; GRAY, D.H. **Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction.** 2002.

RABE, C.; SAYÃO, A. S. F. J.; NUNES, A. L. L. S. Estudo experimental do efeito da temperatura em solos. **Solos e Rochas:** revista latino-americana de Geotecnia. (ABMS/ABGE) São Paulo, v. 26, n. 1, p. 69-83, abr. 2003.

REIS, M. F. P., ELLWANGER, R. M., Metais Pesados em Compostos de Resíduos Sólidos Urbanos. SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, 4, 2004, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: 2004.

RITTER, E. et al. Avaliação da Permeabilidade da barreira de proteção da fundação do aterro sanitário de Piraí. In: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 6, 2002, Vitória. **Anais...**Rio de Janeiro: ABES, 2002.

RODRIGUES, C. L.; TAIOLI, F. Retenção de metais pesados no solo de cobertura do lixão de Ilhabela – SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22, 2003, Joinville. **Anais...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2003.

SHUMAN, L. M. The effect of soil properties on zine adsorption by soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1975. In: COSTA, C. H. R. da. **Estudo de mistura solo-carvão ativado como barreira reativa no tratamento de lixiviados de resíduos sólidos urbanos.** Dissertação (Mestrado em Gerenciamento Ambiental) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2006.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2ª ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 174 p.

VAN RAIJ, B. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo, Piracicaba: Ceres, Potafos, 1991.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. ed. rev. Belo Horizonte: UFMG, 1996.

WORKMAN, J. P.; KEEBLE, R. L. Design and construction of liner systems. In: CHISTENSEN, T. H.; COSSU, R.; STEGMANN, R. **Sanitary Landfilling**: Process, Technology and Environmental Impact. London: Academic Press, 1989.

## **APÊNDICES**

**APÊNDICE A – Exemplo do cálculo do coeficiente de permeabilidade**



**APÊNDICE B – Exemplo do cálculo do coeficiente de  
permeabilidade médio – AM1 Timbó**



## **APÊNDICE C – Resultados das análises da AM1**



**Resultados da permeabilidade para a AM1 [cm/s]**

<b>Dia</b>	<b>Ramo Seco</b>	<b>Umidade Ótima</b>	<b>Ramo Úmido</b>	<b>Água -h<sub>ot</sub></b>
9				1,40E-06
14			4,99E-07	1,37E-06
20		7,75E-07	3,53E-07	1,36E-06
24		2,65E-07		
26	5,13E-07		3,38E-07	1,34E-06
29				2,80E-06
30		2,03E-07		1,89E-06
42				1,57E-06
46	4,98E-07		2,92E-07	
48				1,64E-06
50	5,27E-07		2,26E-07	
51		4,60E-07		1,65E-06
53	4,71E-07		2,36E-07	
55		3,85E-07		1,66E-06
57	5,92E-07		2,66E-07	
58		3,50E-07		3,48E-06
63	6,81E-07	3,48E-07	2,64E-07	2,51E-06
68		3,99E-07		
70	6,11E-07		2,46E-07	
72				2,45E-06
76	4,55E-07	3,59E-07	2,29E-07	2,16E-06
81		3,19E-07		
85	4,97E-07		2,47E-07	3,13E-06
90	3,72E-07	3,31E-07	1,73E-07	2,73E-06
95		2,35E-07		
98	3,62E-07		1,99E-07	
99				3,59E-06
103		2,74E-07		
104	3,11E-07		1,39E-07	
105				3,96E-06
109		1,81E-07		
112	4,16E-07		2,04E-07	4,18E-06
117	4,83E-07	3,06E-07	1,92E-07	4,69E-06
122		4,03E-07		
125	3,51E-07		1,72E-07	4,89E-06
130		2,66E-07		
133	4,03E-07		2,03E-07	5,01E-06
137				
138		3,14E-07		
140	3,41E-07		1,59E-07	4,91E-06
145		2,86E-07		
147	4,54E-07		2,02E-07	4,96E-06
152		3,68E-07		
154	3,13E-07		1,53E-07	4,78E-06
160	2,19E-07	2,39E-07	1,16E-07	4,76E-06
165		1,65E-07		
172	2,65E-07		1,48E-07	4,72E-06
177		2,00E-07		4,58E-06
180	2,43E-07	2,10E-07	1,36E-07	4,85E-06

## Resultados da DQO, COT e pH para o solo de Timbó (AM1)

Dia	DQO				COT				pH			
	S0	S4	S1	S7	S0	S4	S1	S7	S0	S4	S1	S7
0	3034,15				747,60	208,70			8,25	7,91		
1		1321,90										
9			615,70				280,30				7,9	
14	1968,60				840,50				8,56			
20	1838,60				477,90				8,40			
24	1687,25	1792,05			590,00	521,50			8,42	8,32		
25				1391,70				455,20				8,09
26	1720,00				474,40				8,56			
30			1544,75				337,90				8,13	
31	2091,35	1272,60			644,10	430,20			8,75	8,39		
32	1811,55			1039,80	602,50			320,60	8,41			8,14
37			977,45				337,90				7,76	
42					276,50	225,00		207,70	8,53	8,29		8,38
46					668,50	475,10	368,10		8,47	8,26		8
48							492,90					8,41
50					619,90	479,20	382,10	408,70	8,65	8,41	8,3	8,69
55							333,30					8,65
57	1810,85	1266,45			612,90	431,50			8,83	8,65		
58				1145,50				345,00				8,87
66			1284,50				420,00					8,7
67	1763,65	1342,75			576,30	474,20			8,71	8,57		
68				1051,50				345,20				8,85
70	2076,50	1344,35			894,30	350,20						
72				1142,65				593,90				
73			1090,45				387,60					8,69
76			1313,65				449,70					
77	1762,00	1108,80			765,40	601,60		385,40	8,73	8,60		
79				912,50								8,69
81			1206,45				399,70					8,66
82	1743,10	1065,15			590,90	432,60			8,78	8,62		
84				946,75				349,30				8,83
90			1171,20				448,50					8,69
91	1743,55	984,70			537,50	284,80			8,80	8,68		
92				1141,65				302,20				8,74
97			1124,35				241,30					8,74
98	1836,40	1201,70							8,96	8,79		
99				1542,85								8,47
103	1723,40	932,05			503,10	423,10			8,64	8,55		
104				1371,85				448,60				8,29
105			1106,85									8,88
109			937,80				370,20					8,56
110	1833,90	1079,70			488,90	324,00			8,61	8,44		
111				1369,20				354,50				8,58
112			1140,55				309,80					8,44
115	1580,10	911,20			549,20	381,00			8,66	8,53		
116				1175,00				414,40				8,66
117			1020,10				266,90					8,51
122	1760,45	1243,25			436,10	291,50			8,68	8,60		

Dia	DQO				COT				pH			
	S0	S4	S1	S7	S0	S4	S1	S7	S0	S4	S1	S7
124				1461,70				377,20				8,67
131	1566,45	1148,75	1055,15	3149,15	553,70	379,30	265,90	457,90	8,71	8,60	8,64	8,33
137			1171,75				398,00					8,52
138	1484,10	410,75		143,65	423,20	292,90		125,70	8,73	8,61		8,36
145	1574,20	1248,25	939,80	1119,90	299,60	343,20	324,00	306,50	8,74	8,60	8,53	8,56
151	1508,80	1032,10	1059,30	959,40	399,60	278,80	328,00	314,60	9,07	8,84	8,49	8,85
157			902,30				348,00					8,63
158	1533,00	1030,80			415,20	364,40		341,10	8,84	8,63		8,69
160			983,95	1053,10			322,80					8,46
166	1390,45	873,45		776,00	366,90	323,50		293,90	8,83	8,70		8,77
172	1370,65	906,30	729,20	920,15	398,10	324,00		269,50	9,09	8,87	8,52	8,95

Resultados dos sólidos totais, fixos e voláteis para a AM1

Dia	S0			S4			S1			S7		
	ST	SV	SF	ST	SV	SF	ST	SV	SF	ST	SV	SF
0	6388	746	5642									
14	6614	671	5943									
20	7144	1414	5730									
24	7060	1288	5772	6780	1020	5760						
26	7006	952	6054							5938	1216	4722
31	7296	1408	5888	5998	770	5228						
32	7292	966	6326							5498	980	4518
37							5874	1042	4832			
42				6126	678	5448				6522	1456	5066
48	6832	818	6014	5938	440	5498	5736	554	5182	5838	806	5032
56	6852	828	6024	6364	292	6072	5056	700	4356	6130	488	5642
62							5482	456	5026			
66	7178	1182	5996	6052	488	5564				5450	584	4866
73	7216	1368	5848	6364	2906	3458	5920	430	5490	5808	1386	4422
79							6048	674	5374			
84	7108	832	6276	6236	548	5688				6026	448	5578
91	6664	906	5758	6366	700	5666	6246	538	5708	5960	508	5452
98	6970	1102	5868	6074	276	5798	6124	544	5580	6196	582	5614
104							6296	562	5734			
110	6290	1146	5144	6216	496	5720				6306	816	5490
116	6994	1114	5880	6094	530	5564	6144	742	5402	5754	562	5192
124	7160	922	6238	6176	720	5456	5994	750	5244	6274	686	5588
131	7664	1662	6002	6026	758	5268	5956	642	5314	6936	1270	5666
138	7492	1402	6090	6366	810	5556	7046	1818	5228	6382	816	5566
145	7534	1362	6172	5992	470	5522	5900	534	5366	1876	232	1644
152	7132	1112	6020	6150	302	5848	5538	468	5070	6038	494	5544
158	7140	1096	6044	6240	676	5564	5624	600	5024	5984	444	5540
163	7164	822	6342	6184	444	5740	6190	1148	5042			
165										6170	532	5638
171							5952	328	5624			
174	6636	722	5914	5694	294	5400				5900	328	5572
180	6772	824	5948	6246	610	5636	5504	402	5102	5410	444	4966

## **APÊNDICE D – Resultados das análises da AM2 e AM3**

**Resultados da permeabilidade para a AM2 e AM3 [cm/s]**

Dia	AM2			AM3
	Ramo Seco	Umidade Ótima	Ramo Úmido	
9			3,29E-07	
12	7,56E-07		5,34E-07	2,70E-05
15	6,04E-07		3,27E-07	
17				1,19E-05
19				9,53E-06
20		1,05E-06		
25		9,00E-07	5,41E-07	
31				6,05E-06
37	7,54E-07	7,03E-07	3,25E-07	5,86E-06
42	5,12E-07		2,52E-07	5,10E-06
46	4,43E-07	7,27E-07	2,81E-07	6,32E-06
50	3,55E-07		1,73E-07	
53	4,83E-07		3,41E-07	
55		3,64E-07		4,25E-06
58	4,17E-07	3,05E-07	2,68E-07	4,30E-06
62		3,48E-07		5,10E-06
66	3,96E-07		2,21E-07	
72	3,37E-07		1,61E-07	
76		3,83E-07		3,20E-06
81	3,55E-07	2,78E-07	2,01E-07	3,13E-06
85	3,19E-07		1,18E-07	
95	3,65E-07	1,94E-07	1,50E-07	2,76E-06
100	2,97E-07		7,51E-08	
109	3,98E-07	1,42E-07	1,53E-07	2,35E-06
113	3,29E-07		2,10E-07	
117		2,56E-07		2,44E-06
122	3,05E-07	3,45E-07	1,28E-07	2,13E-06
130	2,55E-07	2,37E-07	1,53E-07	2,15E-06
138		2,15E-07		1,79E-06
144	3,08E-07		2,58E-07	
145		2,44E-07		1,77E-06
151	2,81E-07		1,33E-07	1,71E-06
152		2,95E-07		
159		2,33E-07		1,62E-06
165		1,68E-07		1,52E-06
168	2,37E-07		1,05E-07	
177	2,24E-07	1,99E-07	9,07E-08	1,48E-06
180	2,33E-07	2,14E-07	9,08E-08	1,45E-06

## Resultados da DQO, COT e pH para o solo de Chapecó (AM2)

Dia	DQO				COT				pH			
	S0	S6	S2	S9	S0	S6	S2	S9	S0	S6	S2	S9
0	3034,15				747,60				8,25			
14	1968,60				840,50				8,56			
17		1476,45		904,65		437,50		379,70		8,02		8,14
20	1838,60				477,90				8,40			
23		636,20		379,30		311,30		151,80		8,10		7,82
24	1687,25				590,00				8,42			
26	1720,00		2302,25		474,40		626,80		8,56		7,48	
29		970,70		521,70		358,30		191,10		8,02		7,42
31	2091,35				644,10				8,75			
32	1811,55		958,35		602,50		355,60		8,41		7,55	
38			619,70			373,70	251,40	191,20		7,81	7,70	7,80
42					276,50				8,53			
46						418,20		277,30		7,78		7,75
48					668,50		169,30		8,47		7,45	
53						430,10		287,40		8,37		8,00
55							339,20				6,83	
56					619,90				8,65			
62							263,80				8,42	
63		1246,20		818,15		425,60		297,70		8,64		7,97
66	1810,85				612,90				8,83			
70		1408,90		999,05		436,50		299,30		8,68		8,12
72			837,25				259,90				8,81	
73	1763,65	1385,65		830,90	576,30	555,80		286,00	8,71			
76	2076,50				894,30							
79			756,80				270,40				8,12	
81		1113,40		837,50		504,40		342,80		8,73		8,38
82			806,80				252,00					
84	1762,00				765,40				8,73			
88		1224,65		817,10		433,70	219,20	325,90		8,45		8,35
90			816,35								8,21	
91	1743,10				590,90				8,78			
95		1333,80		434,76		421,90		304,40		8,57		8,51
97			752,25				308,40				8,26	
98	1743,55				537,50				8,80			
102		1241,30		895,95						8,69		8,69
105	1836,40		1003,75				251,60		8,96		8,32	
106		1398,85		822,15		419,20		321,70		8,37		8,39
109	1723,40				503,10				8,64			
111			963,10								8,36	
113		1464,55		965,85		388,30		265,40		8,33		8,27
116	1833,90		803,40		488,90		324,70		8,61		8,10	
118		1246,20				453,80				8,32		
122			970,10	792,90			323,10	346,80			8,14	8,38
124	1580,10				549,20				8,66			
128		1290,30		1292,20		403,40		342,10		8,45		8,46
131	1760,45		1026,65		436,10		408,70		8,68		8,18	
135		1395,35		890,20		398,40		375,10		8,35		8,39
138	1566,45		1267,95		553,70		368,50		8,71		8,26	

Dia	DQO				COT				pH			
	S0	S6	S2	S9	S0	S6	S2	S9	S0	S6	S2	S9
142	980,50			905,15	322,00		299,10		8,40		8,24	
144	1355,80				360,40				8,10			
145	1484,10				423,20				8,73			
149	1311,30			1234,20	369,80		276,80		8,40		7,89	
151	1650,40				299,50				8,16			
152	1574,20				299,60				8,74			
154	1233,30		1214,30		307,80		312,20		8,62		7,65	
157	1508,80				399,60				9,07			
158	1285,90								8,21			
159					319,80							
162	1216,30			988,75	358,10		344,60		8,48		7,64	
163	1159,05				225,80				7,84			
165	1533,00				415,20				8,84			
171	905,10	1340,00	1222,80		330,00	368,20	334,90		8,59	7,83	8,46	
172												
174	1390,45								8,83			
175					366,90							
177	990,60		1058,05		240,40		310,40		8,80		8,64	
180	1370,65	888,95	1040,55	1099,80	398,10	302,90	353,10	336,10	9,09	8,52	8,10	8,02

Resultados dos sólidos totais, fixos e voláteis para a AM2

Dia	S0			S6			S2			S9		
	ST	SV	SF	ST	SV	SF	ST	SV	SF	ST	SV	SF
0	6388	746	5642									
14	6614	671	5943									
17				5908	814	5094				4198	938	3260
20	7144	1414	5730									
24	7060	1288	5772	5214	736	4478				2966	720	2246
26	7006	952	6054				6864	1148	5716			
29				2476	430	2046				4990	1320	3670
32	7292	966	6326				4842	766	4076			
38				5726	968	4758	4734	1529	3205	5616	1882	3734
46				5148	974	4174				5358	1750	3608
48	6832	818	6014				5520	1788	3732			
53				5592	1226	4366				5882	2344	3538
55	6852	828	6024				5840	1556	4284			
62							5240	1488	3752			
63				5232	1176	4056				5326	1800	3526
66	7178	1182	5996									
70				4944	1038	3906				5008	1444	3564
72	7216	1368	5848				5076	1042	4034			
79							5186	1200	3986			
81				5240	582	4658				5466	1526	3940
84	7108	832	6276									
88				5544	640	4904				5168	1290	3878
91	6664	906	5758				4800	878	3922			
95				5356	882	4474				5126	1198	3928

Dia	S0			S6			S2			S9		
	ST	SV	SF	ST	SV	SF	ST	SV	SF	ST	SV	SF
98	6970	1102	5868				5128	980	4148			
106				5098	548	4550				3516	816	2700
109	6290	1146	5144									
113				5316	768	4548				4808	964	3844
115	6994	1114	5880				5226	1178	4048			
118				5364	806	4558						
122							5180	1064	4116	4894	946	3948
124	7160	922	6238									
128				5070	674	4396						
130	7664	1662	6002				4688	762	3926			
135				5174	682	4492				4910	912	3998
137							5110	1158	3952			
138	7492	1402	6090									
142				4858	606	4252				4674	818	3856
144							5070	960	4110			
145	7534	1362	6172									
149				5490	800	4690				4748	608	4140
151							4690	906	3784			
152	7132	1112	6020									
154				4962	706	4256				5058	774	4284
157	7140	1096	6044									
158							4654	794	3860			
163	7164	822	6342	4982	564	4418	4918	672	4246			
171				4726	580	4146	4946	536	4410	4400	728	3672
174	6636	722	5914									
177				5034	712	4322				4950	898	4052
180	6772	824	5948	5118	806	4312	4754	872	3882	5246	1176	4070



## **APÊNDICE E – Resultados das análises da AM4**

## Resultados da permeabilidade para a AM4 [cm/s]

Dia	Ramo Seco	Umidade Ótima	Ramo Úmido	Água -h <sub>ot</sub>
17				6,68E-08
19			1,27E-07	
20			1,66E-07	6,65E-08
24		2,58E-08		
26				7,22E-08
30			1,43E-07	4,65E-08
42				8,12E-08
46		1,96E-08		
48			1,61E-07	8,79E-08
51		2,32E-08		1,29E-07
55				6,04E-08
58				5,38E-07
63			1,15E-07	
66				1,44E-07
68		1,54E-08	1,26E-07	
72				1,42E-07
77		2,25E-08	5,30E-08	8,42E-08
81		1,86E-08		
85			2,62E-07	2,85E-07
90		1,15E-08	6,86E-08	9,76E-08
95	5,08E-05	2,91E-08		
99	2,37E-05		1,57E-07	2,11E-07
104		2,21E-08	4,80E-08	
105				7,19E-08
109	1,00E-05			
113	8,71E-06		1,29E-07	1,09E-07
117			1,46E-07	
118				1,59E-07
122	4,27E-06	1,23E-08		
125			1,00E-07	
128				4,19E-07
130	1,06E-06	2,71E-09		
133			1,46E-07	
135				3,71E-07
138	6,06E-07	1,86E-08		
140			9,45E-08	5,00E-07
144	3,61E-07	1,21E-08		
147			2,27E-07	
149				1,85E-07
154	3,27E-07	2,75E-08	7,33E-08	1,16E-07
157	3,45E-07			
159		1,75E-08		
160			3,29E-08	1,11E-07
166	2,37E-07	6,58E-09		
172			8,32E-08	5,87E-08
177	2,24E-07	8,95E-09		6,08E-08
180	2,20E-07	1,16E-08	6,61E-08	1,05E-07

## Resultados da DQO, COT e pH para o solo de Curitiba (AM4)

Dia	DQO				COT				pH			
	S0	S5	S3	S8	S0	S5	S3	S8	S0	S5	S3	S8
0	3034,2				747,6				8,3			
12		2420,9				292,6						
14	1968,6				840,5				8,6	8,3		
20	1838,6	1246,5			477,9	556,8			8,4	8,4		
24	1687,3				590,0				8,4			
26	1720,0	2784,5		1575,5	474,4	696,7		506,2	8,6	8,6		8,5
31	2091,4				644,1				8,8			
32	1811,6		2276,0	1168,3	602,5		622,2	333,3	8,4		8,1	8,4
38						340,1				8,5		
42					276,5			180,3	8,5			8,2
46						549,5				8,5		
48					668,5			169,0	8,5			7,9
53						659,5				8,5		
55							447,5				8,7	
56					619,9				8,7			
57								158,3				7,9
62		1673,3	1183,6			590,4	360,4			8,8	7,9	
66	1810,9				612,9				8,8			
67				790,1				249,2				8,2
68		932,7				525,9						
70										8,7		
72		1874,1				570,1						
73	1763,7				576,3				8,7			
74				1006,0				364,5				7,4
76	2076,5				894,3							
77				1038,1				374,4				
79						670,6						
81		1747,6	1168,9							8,7		
82							320,1					
84	1762,0				765,4			378,1	8,7			
85				965,4								8,2
88		1702,1				511,6				8,7		
90			1426,5				572,9				7,3	
91	1743,1				590,9				8,8			
92				1060,0				373,9				8,4
95		1742,2				487,9				8,8		
97							242,4				6,6	
98	1743,6		692,6		537,5				8,8			
99				976,4				335,6				8,4
102		1780,9								9,0		
105	1836,4	1522,0				463,4			9,0	8,6		
106				1379,1								8,1
109	1723,4				503,1				8,6			
110				1075,8				394,7				8,2
111			753,8				201,0				6,5	
112		1981,4				450,3				8,6		

Dia	DQO				COT				pH			
	S0	S5	S3	S8	S0	S5	S3	S8	S0	S5	S3	S8
116	1833,9				488,9				8,6			
117				602,2				575,0				8,3
118						513,6				8,5		
122		1446,0										
124	1580,1				549,2				8,7			
125				988,6				351,3				8,5
128						470,4				8,5		
130		1514,4	121,3					105,7			6,4	
131	1760,5				436,1				8,7			
132				1125,3				325,3				8,5
133												
135		1344,4				503,0				8,5		
137			931,4					237,1			6,5	
138	1566,5				553,7				8,7			
139				1275,5				385,8				8,1
142		1306,5				383,6				8,5		
144			404,0					148,0			6,5	
145	1484,1				423,2				8,7			
146				752,8				233,4				7,8
149		1339,2				356,8				8,4		
151			269,3					127,3			6,4	
152	1574,2				299,6				8,7			
153		1359,8		1012,6		365,6		254,4		8,8		8,2
157	1508,8				399,6				9,1			
158			405,5	1200,1				125,4 295,5			6,3 7,8	
160						429,7				8,5		
162		1381,5										
163			389,7					113,7			6,5	
165	1533,0				415,2				8,8			
171		1346,8				448,2				8,9		
174	1390,5								8,8			
175				961,9	366,9			289,0				8,3
177		1341,1				394,2				8,9		
180	1370,7	1154,6	135,0	927,8	398,1	389,2		300,9	9,1	8,6		8,8

## Resultados dos sólidos totais, fixos e voláteis para a AM4

Dia	S0			S5			S3			S8		
	ST	SV	SF	ST	SV	SF	ST	SV	SF	ST	SV	SF
0	6388	746	5642									
14	6614	671	5943	6629	1104	5525						
20	7144	1414	5730	7012	1716	5296						
24	7060	1288	5772									
26	7006	952	6054	6784	1238	5546				5394	832	4562
31	7296	1408	5888									
32	7292	966	6326				4368	832	3536	3398	650	2748
37				6570	1258	5312						
42										2610	502	2108
46				6090	842	5248						
48	6832	818	6014									
50										2682	430	2252
53				6250	684	5566						
56	6852	828	6024				3294	650	2644	4132	868	3264
62				6510	690	5820	1606	430	1176			
66	7178	1182	5996									
70				5878	916	4962						
73	7216	1368	5848							4860	1016	3844
79				6698	870	5828						
84	7108	832	6276							4694	590	4104
88				6714	348	6366						
91	6664	906	5758							5142	618	4524
95				6788	996	5792						
98	6970	1102	5868							4832	570	4262
105				5948	738	5210						
109	6290	1146	5144									
110										5352	610	4742
112				7070	920	6150						
116	6994	1114	5880							3302	272	3030
122				6806	648	6158						
124	7160	922	6238							5318	580	4738
128				7104	1410	5694						
130	7664	1662	6002				800	256	544			
133				6986	1042	5944				5346	848	4498
138	7492	1402	6090							5144	412	4732
140				7032	454	6578						
146	7534	1362	6172	7280	1114	6166				4350	668	3682
153	7132	1112	6020	7060	840	6220				4858	290	4568
157	7140	1096	6044									
158										4954	178	4776
160				7240	880	6360						
163	7164	822	6342							3826	348	3478
171				8110	1470	6640						
174	6636	722	5914							5064	508	4556
177				7238	510	6728						
180	6772	824	5948	6792	938	5854				5054	218	4836