



**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**

Gislaine Praetorius Mello Alves

**CAPACIDADE DE ATENUAÇÃO DO SOLO DE FUNDO DA
LAGOA ANAERÓBIA DA ETE DE PASSO FUNDO/RS**

Passo Fundo

2005

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**

Gislaine Praetorius Mello Alves

ORIENTADOR: Prof. Antônio Thomé, Dr. Eng.

**CAPACIDADE DE ATENUAÇÃO DO SOLO DE FUNDO DA
LAGOA ANAERÓBIA DA ETE DE PASSO FUNDO/RS**

**Dissertação apresentada à Faculdade
de Engenharia e Arquitetura da
Universidade de Passo Fundo, para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia.**

Passo Fundo

2005

Gislaine Praetorius Mello Alves

**CAPACIDADE DE ATENUAÇÃO DO SOLO DE FUNDO DA LAGOA ANAERÓBIA
DA ETE DE PASSO FUNDO/RS**

Prof. Doutor Antônio Thomé – UPF – Orientador

Prof. Doutor Antônio Thomé – UPF – Coordenador

Banca Examinadora:

Prof. PhD. Nilo Cesar Consoli – UFRGS – Examinador

Prof. Doutor Henrique da Silva Pizzo – UPF – Examinador

Prof. Doutor Pedro Domingues Marques Prietto – UPF - Examinador

Passo Fundo

2005

Dedico esta dissertação ao meu esposo Clóvis, e aos meus pais,
Anarolino e Nair.

Agradeço em especial a Deus, por ele estar sempre ao meu lado, por me dar força, coragem e esperança;

Aos meus pais Anarolino e Nair pelo ensinamento de viver com dignidade, pelo incentivo e pela oportunidade do aprendizado;

Ao meu esposo Clovis pelo amor, incentivo e compreensão;

Ao orientador Antônio Thomé pelo conhecimento;

A CORSAN, por propiciar a coleta dos materiais, a execução dos ensaios e o fornecimento de informações.

Ao Laboratório de Geotecnia, em especial ao laboratorista Leunir de Freitas.

Ao estagiário e amigo Anderson Fonini, pela essencial e imprescindível participação no desenvolvimento desta dissertação.

Ao Mestrado de Engenharia, em especial a secretária Marli Tagliari pelo companheirismo.

Aos colegas os quais se tornaram amigos especiais, Aílson, Andréa, Jupira, Márcia, Rodrigo e Simone.

A todos o meu mais sincero obrigado.

RESUMO

Nos dias atuais, existe uma maior preocupação com o meio ambiente, pois este vem passando por transformações que decorrem do desenvolvimento da sociedade. A preservação do meio ambiente garantirá a qualidade de vida dos seres humanos, que pelas necessidades vitais, geram resíduos, os quais devem ser tratados. Os métodos mais usuais são as ETEs, Estações de Tratamento de Esgotos, as quais devem ser dimensionadas corretamente para que não haja infiltrações excessivas no solo, pois estas infiltrações poderão acarretar o comprometimento do lençol freático, impossibilitando sua utilização para fins de abastecimento. O presente trabalho visa verificar a capacidade de atenuação do solo de fundo da lagoa anaeróbia da ETE Araucárias, situada no Município de Passo Fundo, pois esta encontra-se em uma região de nascentes e banhado, o que poderá comprometer a qualidade ambiental do local. Para a verificação da capacidade de atenuação foi necessária a confecção de dois equipamentos, denominados equipamento de coluna e equipamento de colmatação, a caracterização e verificação da permeabilidade do solo da lagoa anaeróbia e a caracterização do contaminante (esgoto). Através do equipamento de coluna se verificou a capacidade de atenuação dos solos em relação ao esgoto, sendo analisado os parâmetros de DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e DQO (Demanda Química de Oxigênio), antes e após percolação do esgoto nas amostras de solo. O equipamento de colmatação propiciou um conhecimento prévio do grau de colmatação dos solos da lagoa anaeróbia devido a disposição de esgoto sobre os solos, medindo-se a variação da permeabilidade em função do tempo de percolação. O solo da lagoa anaeróbia foi caracterizado por métodos geotécnicos e classificados por métodos geotécnicos e pedológicos. A permeabilidade do solo da lagoa anaeróbia foi verificada por métodos de campo e de laboratório. No campo se realizou ensaio em cavas e ensaio em piezômetros. No laboratório a permeabilidade foi obtida através dos equipamentos montados. O efluente (esgoto) foi caracterizado, considerando os parâmetros químicos e biológicos. A lagoa anaeróbia possui dois tipos de solo: gleissolo melânico, localizado na área de corte e latossolo vermelho distrófico, localizado na área de aterro, estes solos apresentaram diferentes valores de permeabilidade, variando de 10^{-4} cm/s a 10^{-5} cm/s. O efluente analisado (esgoto) apresentou uma variabilidade de parâmetros e uma alta biodegradabilidade. Os parâmetros analisados no equipamento de coluna demonstraram que existe atenuação no solo, pois houve uma redução dos parâmetros analisados. O solo utilizado no equipamento de colmatação apresentou uma redução de permeabilidade, demonstrando um início de colmatação. Com base nos resultados obtidos apesar do solo apresentar uma boa capacidade de atenuação, deverá se prever uma impermeabilização no solo de fundo, já que na área de corte o lençol freático aflora nos períodos de alta pluviosidade.

Palavras-chaves: Capacidade de Atenuação, contaminação de solo, estação de tratamento de esgoto

ABSTRACT

In the current days, there is a larger concern with the environment, mainly because of the transformations that happened due society development. The preservation of the environment will guarantee the life quality of the human beings. Every people generate residues (sewers) that must be treated. The usual methods are Sewers Treatment Stations (STS), which should be correctly designed to avoid excessive infiltration in the soil. The present work has the objective to verify the attenuation capacity of the bottom soil from an anaerobia lagoon of the STS that is being built in Passo Fundo City. It was designed and built two equipments, denominated column and colmatation equipments. It was carried out geotechnical characterization tests and permeability tests of the anaerobia lagoon bottom soil. Also was made the chemical e biological characterization of the effluent (sewers). The parameters analyzed in column equipment were BOD (Biological Oxygen Demand) and COD (Chemistry Oxygen Demand), before and after sewer percolation in the soil samples. The colmatation equipment gave a previous knowledge of the degree of clogging of the bottom soils of the anaerobia lagoon due to sewer disposition. It was measured the permeability variation in function percolation time. The anaerobia lagoon has two soil types: malanic gleysoil, located in the court area and distrofic red latosoil, located in the embankment area. These soils presented permeability values varying of 10^{-4} cm/s to 10^{-5} cm/s. The effluent analyzed presented a great variability of parameters values and a high biodegradability. The parameters analyzed in the column equipment demonstrated that have occurred some level of attenuation in the soil, because was observed a reduction COD and BOD after percolation. The soil used in the colmatation equipment presented a permeability reduction, demonstrating that colmatation is beginning in the soil. With the results obtained is possible say that the soils presents a good attenuation capacity, however it will be necessary to use some kind of material with low permeability in court area of the anaerobia lagoon, once the ground water is over ground surface during the winter time.

Key words: attenuation capacity; soil contamination; sewers treatment station.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Composição do esgoto.	8
Figura 2.2 – Variação da vazão e do teor de sólidos sedimentáveis dos efluentes de uma cidade de 50.000 habitantes, durante as 24 horas do dia.	11
Figura 2.3 – Perfil de LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico.	20
Figura 2.4 – Perfil de GEISSOLO MELÂNICO Distrófico hístico.	21
Figura 2.5 – Perfil de ORGANOSSOLO MÉSICO Sáprico típico.	22
Figura 2.6 – Perfil de solo com seqüência de horizontes pedogenéticos.	22
Figura 2.7 – Valores de permeabilidade para diferentes tipos de solo.	28
Figura 2.8 – Transporte de contaminantes por advecção.	31
Figura 2.9 – Transporte de contaminantes por advecção e difusão.	31
Figura 3.1 – Fluxograma do Programa Experimental.	33
Figura 3.2 – Mapa de situação e localização da Área de Estudo.	37
Figura 3.3 – Local de implantação da ETE Araucárias.	38
Figura 3.4 – Vista aérea da ETE Araucárias, com as Lagoas de Estabilização.	39
Figura 3.5 – Localização da área atendida inicialmente pela ETE Araucárias.	39
Figura 3.6 – Localização das bacias atendidas pela ETE Araucárias após ampliação da rede de coleta de esgoto.	40
Figura 3.7- Planta Topográfica e localização da ETE na área de implantação.	41
Figura 3.8 – Vista da Lagoa Anaeróbia.	42
Figura 3.9– Área de corte da Lagoa Anaeróbia.	42
Figura 3.10 – Área de aterro da Lagoa Anaeróbia.	42
Figura 3.11- Perfil ilustrativo do solo natural - ST 17.	43
Figura 3.12- Perfil ilustrativo do solo natural - ST14.	43
Figura 3.13 – Local de coleta do esgoto na Antiga ETE de Passo Fundo.	44
Figura 3.14 – Vala para coleta do solo da área de corte.	45
Figura 3.15 – Vala para coleta do solo da área de aterro.	45
Figura 3.16 – Solo da área de corte.	46
Figura 3.17 – Solo da área de aterro.	46

Figura 3.18 –Trincheira para a coleta das amostras indeformadas para o equipamento de coluna da área de aterro	47
Figura 3.19 –Trincheira para a coleta das amostras indeformadas para o equipamento de coluna da área de corte.....	47
Figura 3.20 –Proteção dos blocos de solo utilizados na confecção dos corpos de prova para o equipamento de coluna.	48
Figura 3.21 – Moldagem da amostra indeformada do solo da área de aterro para uso no equipamento de coluna.....	48
Figura 3.22 – Corpos de prova para o equipamento de coluna conservados sob refrigeração.....	49
Figura 3.23 – Corpo de prova da área de corte para uso no equipamento de coluna.	49
Figura 3.24 – Cravação dos tubos no solo para coleta das amostras indeformadas para o equipamento de colmatação.	50
Figura 3.25 – Escavação para a retirada dos tubos para coleta das amostras indeformadas para o equipamento de colmatação.....	50
Figura 3.26 –Amostras indeformadas para o equipamento de colmatação no laboratório.....	51
Figura 3.27 – Coleta do esgoto para a caracterização.	52
Figura 3.28 – Medição da Vazão na calha Parshal.....	53
Figura 3.29 – Coleta do esgoto para o equipamento de coluna.....	53
Figura 3.30 – Coleta do esgoto para o equipamento de colmatação.	54
Figura 3.31 – Armazenamento do esgoto para o equipamento de colmatação	54
Figura 3.32 – Desenho da execução do ensaio em cavas sem escala.....	56
Figura 3.33 – Foto do ensaio em cavas.	56
Figura 3.34 – Desenho da execução de ensaio de infiltração.....	57
Figura 3.35 – Foto do ensaio de infiltração em piezômetro.	58
Figura 4.1 –Equipamento de lixiviação em coluna (ASTM D 4874).....	62
Figura 4.2 –Projeto dos cilindros do equipamento de coluna.	63
Figura 4.3 –Projeto dos discos do equipamento de coluna.	64
Figura 4.4 –Projeto da base do cilindro com solo do equipamento de coluna.	65
Figura 4.5 –Projeto da base do cilindro com água e contaminante do equipamento de coluna.	66
Figura 4.6 –Projeto do <i>top cap</i> do cilindro com solo e água do equipamento de coluna.....	67
Figura 4.7 –Projeto do <i>top cap</i> do cilindro com contaminante do equipamento de coluna.	68

Figura 4.8 –Projeto do disco poroso e do <i>top cap</i> pequeno do cilindro com solo do equipamento de coluna.....	69
Figura 4.9 – Desenho esquemático representando o equipamento de coluna.	70
Figura 4.10 –Detalhe geral do equipamento de coluna.	71
Figura 4.11 – <i>End cap</i> com disco poroso e <i>o-ring</i> do cilindro com solo.	71
Figura 4.12 – Entrada de efluente e ar comprimido do Equipamento de Coluna.....	72
Figura 4.13 – Cilindro do solo com corpo de prova revestido com membrana de látex.....	73
Figura 4.14 – Montagem do Equipamento de Colmatação, em planta.	74
Figura 4.15 – Montagem do Equipamento de Colmatação, perfil.	74
Figura 4.16 – Amostra de solo da área de corte com lama bentonita.....	75
Figura 4.17 – Amostra de solo da área de aterro com lama bentonita.	75
Figura 4.18 – Abastecimento do equipamento de colmatação com efluente.	76
Figura 4.19 – Equipamento de colmatação.	76
Figura 5.1 – Curvas Granulométricas da área de corte.	78
Figura 5.2 – Características físicas dos solos da área de corte.....	78
Figura 5.3 – Curvas Granulométricas da área de aterro.....	80
Figura 5.4 – Classificação dos solos da área de aterro.....	80
Figura 5.5 – Caracterização dos solos estudados através das análises básicas e condutividade elétrica.	82
Figura 5.6 – CTC dos solos estudados.....	82
Figura 5.7- Gráfico da variação volume x tempo para decidir pelo término do ensaio em cavas.....	83
Figura 5.8- Gráfico variação volume x tempo para decidir pelo término do ensaio em piezômetro.	84
Figura 5.9- Gráfico tempo x volume da área de corte para obter a vazão do equipamento de colmatação.....	86
Figura 5.10- Gráfico tempo x volume da área de aterro para obter a vazão do equipamento de colmatação.....	86
Figura 5.11 – Caracterização e comparação dos parâmetros DQO e DBO.....	89
Figura 5.12– Caracterização e comparação dos parâmetros sólidos totais e suspensos do efluente.	89
Figura 5.13– Caracterização e comparação dos parâmetros alcalinidade, cloretos, e nitrogênio do efluente.	90
Figura 5.14– Caracterização e comparação dos parâmetros pH, nitrato e fósforo total do efluente.	90

Figura 5.15– Relação DQO/DBO do efluente.....	92
Figura 5.16– Vazões do efluente na antiga ETE medida ao longo do dia.....	93
Figura 5.17– Capacidade de atenuação do solo da área de corte para DBO ₅	94
Figura 5.18– Capacidade de atenuação do solo da área de corte para DQO.....	95
Figura 5.19 - Capacidade de atenuação do solo da área de aterro para DQO e DBO ₅	95
Figura 5.20 – Redução da permeabilidade no equipamento de colmatação.....	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Patógenos e organismos indicadores comumente encontrados no esgoto bruto.....	5
Quadro 2.2 – Tempo de sobrevivência de microrganismos no solo sob temperatura ambiente 20 a 30°C	6
Quadro 2.3 – Principais contaminantes de esgotos, seus significados e origens.....	6
Quadro 2.4 – Esquema generalizado da degradação microbiana dos constituintes orgânicos no esgoto.	7
Quadro 2.5 – Principais constituintes do esgoto doméstico.....	9
Quadro 2.6 - Características típicas de Lagoas de Estabilização.	14
Quadro 2.7 - Interferência de contaminantes na qualidade das águas subterrâneas em escala global. ..	18
Quadro 2.8 – Horizontes pedogenéticos com características específicas.....	23
Quadro 2.9 – Significados dos horizontes diagnósticos superficiais.	23
Quadro 2.10 – Mecanismos e processos do movimento de poluentes.	30
Quadro 3.1 – Número de amostras coletadas e os tipos e números de parâmetros e análises realizadas para a caracterização dos materiais utilizados na pesquisa.....	35
Quadro 3.2 – Número de amostras coletadas e números de ensaios realizados nos equipamentos montados.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características químicas e biológicas dos esgotos domésticos	10
Tabela 5.1 - Características Físicas do solo da ETE Araucárias – Área de Corte.....	77
Tabela 5.2 – Classificação dos solos da área de corte.....	79
Tabela 5.3 - Características Físicas do solo da ETE Araucárias – Área de Aterro.	79
Tabela 5.4 – Classificação dos solos da área de aterro.	81
Tabela 5.5 - Resultados de análise básica e micronutrientes do solo da ETE Araucárias.....	81
Tabela 5.6 – Dados necessários para o cálculo de permeabilidade no equipamento de coluna.....	85
Tabela 5.7 – Coeficientes de permeabilidade obtidos.....	88
Tabela 5.8 - Características do Esgoto de Passo Fundo.....	88
Tabela 5.9 – Caracterização e comparação do parâmetro Coliforme Fecal do Esgoto de Passo Fundo	91
Tabela 5.10 - Horários e vazões utilizados para determinar o horário da coleta de efluente.....	92
Tabela 5.11 – Capacidade de atenuação dos solos da área de corte e aterro.....	94

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CETEC	Centro de Tecnologia
CIENTEC	Fundação de Ciência e Tecnologia
CTA	Capacidade de Troca de ânions
CTC	Capacidade de Troca de cátions
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxigênio, em 5 dias, à 20°C
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
HRB	<i>Highway Research Board</i>
K	Coefficiente de Permeabilidade
IP	Índice de Plasticidade
LACE	Laboratório de Controle de Efluentes
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
NBR	Norma Brasileira
NMP	Número mais provável
PCBs	Bifenila Policlorada (do inglês : <i>Polychlorinate Bifenil</i>)
SPT	<i>Standard Penetration Tests</i>
SS	Sólidos Suspensos
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA	2
1.3 JUSTIFICATIVAS.....	2
1.4 OBJETIVOS	3
1.4.1 OBJETIVO GERAL.....	3
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 ESGOTO.....	4
2.2 LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO	11
2.3 ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	15
2.3.1 AUTODEPURAÇÃO.....	18
2.4 SOLO	19
2.5 MOVIMENTO DE POLUENTES.....	28
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	33
3.2 DESCRIÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO	36
3.3 MATERIAIS UTILIZADOS	41
3.4 MÉTODOS UTILIZADOS.....	44
4 EQUIPAMENTOS DESENVOLVIDOS.....	61
4.1 EQUIPAMENTO DE COLUNA	61
4.1.1 PROJETO E MONTAGEM.....	61
4.2 EQUIPAMENTO DE COLMATAÇÃO	73
4.2.1 PROJETO E MONTAGEM.....	73
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	77
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....	77
5.2 PERMEABILIDADE	83
5.2.1 ENSAIO EM CAVAS	83
5.2.2 ENSAIO EM SONDAGENS – PIEZÔMETRO.....	84
5.2.3 ENSAIO NO EQUIPAMENTO DE COLUNA	84
5.2.4 ENSAIOS NO EQUIPAMENTO DE COLMATAÇÃO.....	85
5.3 CARACTERIZAÇÃO DO ESGOTO	88
5.4 MEDIÇÃO DA VAZÃO	92
5.5 ENSAIO DE COLUNA	93
5.6 ENSAIO DE COLMATAÇÃO.....	96
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	97
6.1 CONCLUSÕES DA PESQUISA.....	97
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	98
REFERÊNCIAS	99

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A água é um recurso natural essencial à vida, ao desenvolvimento econômico e ao bem-estar social. Embora abundante no território nacional, já apresenta comprometimento da sua qualidade, principalmente nas regiões próximas aos grandes centros e em regiões topograficamente consideradas como divisores de águas, pois nestes locais existem várias nascentes que, se contaminadas, interferem na qualidade de várias bacias, sendo este o caso da cidade de Passo Fundo.

As águas subterrâneas constituem a maior reserva estratégica de água doce do planeta, sendo que no Brasil as reservas são estimadas em 112 bilhões de metros cúbicos, com uma disponibilidade atual de 5.000 m³/habitante/ano.

As águas subterrâneas são naturalmente mais protegidas dos agentes contaminantes do que as superficiais, porém a grande expansão das atividades antrópicas, nas áreas urbanas e rurais, tem provocado a poluição pontual das águas subterrâneas, sobretudo através dos lixões, aterros industriais, armazenamento, manuseio e descarte inadequados de produtos químicos, efluentes e resíduos, incluindo os usos indiscriminados de agrotóxicos e fertilizantes. Nos últimos anos, a contaminação das águas subterrâneas tem se revelado um grave problema.

1.2 Problema de pesquisa

Na cidade de Passo Fundo encontra-se em fase de implantação a Estação de Tratamento de Esgotos - ETE Araucárias, localizada em uma região de nascentes e banhado, que segundo o art. 51 do Código Estadual do Meio Ambiente, Capítulo VII, é considerada objeto de especial proteção.

Tendo em vista que o início do projeto é anterior à legislação ambiental, em uma época em que as questões ligadas ao meio ambiente não eram contempladas, o projeto não previu nenhum tipo de impermeabilização e não levou em consideração o fato de localizar-se em uma área de proteção. Portanto, observa-se a necessidade de verificar a possível contaminação do solo e das águas subterrâneas, através dos poluentes existentes no esgoto.

1.3 Justificativas

Atualmente, a cidade de Passo Fundo não dispõe de uma Estação de Tratamento de Esgotos. O efluente coletado é lançado no rio Passo Fundo sem nenhum tratamento, poluindo as águas superficiais. O funcionamento da ETE Araucárias é muito importante para o Município e para o meio ambiente. Porém, se não for instalada corretamente o esgoto continuará poluindo os recursos hídricos, atingindo a população de Passo Fundo e Região.

No esgoto encontram-se presentes vários microorganismos que causam doenças nos homens e animais, tais como vírus e bactérias, e também metais pesados, como chumbo e mercúrio, que envenenam peixes e vegetais e que podem ser transferidos para a cadeia alimentar do homem e de outros animais.

O Art. 132 do Código Estadual do Meio Ambiente determina que: “É proibida a disposição direta de poluentes e resíduos de qualquer natureza em condições de contato direto com corpos d’água naturais superficiais ou subterrâneas, em regiões de nascentes ou em poços e perfurações ativas ou abandonadas, mesmo secas.” (CÓDIGO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE, 2000, p.65).

Como a ETE Araucárias encontra-se em uma região, que merece atenção com as questões de poluição, tanto de solo quanto de água subterrânea, e seu projeto não prevê

nenhuma proteção a estes recursos, observa-se a necessidade de se desenvolver pesquisas referentes a estas contaminações.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem por objetivo geral analisar uma provável contaminação do solo e do lençol freático na área de implantação da Estação de Tratamento de Esgoto, verificando a permeabilidade do solo, a capacidade de atenuação do solo em relação ao contaminante (esgoto) e a colmatação do solo de fundo da ETE Araucárias.

1.4.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Caracterizar o solo local;
- Caracterizar o contaminante (esgoto);
- Projetar e montar um equipamento de coluna;
- Realizar ensaios de atenuação do solo local;
- Projetar e montar um equipamento para verificar a colmatação do solo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são feitas considerações sobre a composição do esgoto, os tipos e funcionamento das lagoas de estabilização, as formas de contaminação das águas subterrâneas, as classificações e composições dos solos e o movimento de poluentes.

2.1 Esgoto

O esgoto é um composto de 99,9% de água e apenas 0,1% de sólidos. Nele tem-se presente vários microorganismos que causam doenças nos homens e animais, tais como vírus da hepatite, bactérias de doenças como cólera, salmonelose, parasitos causadores de ancilostomose, ascaridiose, etc. Pode-se observar as quantidades de alguns destes vírus, bactérias, protozoários e helmintos no Quadro 2.1.

Quando se utiliza a água, inicia-se a formação do esgoto. O esgoto é oriundo das diversas modalidades de despejos de águas, tais como: águas servidas domésticas, comerciais, industriais, prédios públicos, água pluvial e outras. (PINHEIRO, 2003).

O líquido existente no esgoto nada mais é do que um meio de transporte para as substâncias orgânicas, inorgânicas e microorganismos eliminados pelo homem diariamente. Os sólidos existentes no esgoto são responsáveis pela deterioração da qualidade do corpo de água.

O despejo direto de efluentes de águas residuárias nos corpos de águas receptoras pode provocar danos de naturezas diversas dependendo do volume e natureza dos esgotos, da vazão e características físicas, químicas, biológicas, radiotivas e térmicas das águas receptoras.(SILVA e PRUSKI, 2000).

Patógenos ou Indicadores		Doença ou papel	Nº por litro
Bactérias	<i>Campylobacter</i> spp.	Gastroenterite	37.000
	<i>Clostridium perfringens</i>	Organismo indicador	6×10^5 - 8×10^5
	<i>E. coli</i>	Organismo indicador	10^7 - 10^8
	<i>Salmonella</i> spp.	Gastroenterite	20-80.000
	<i>Shigella</i>	Disenteria	10-10,000
Vírus	Poliovirus	Indicador	1.800-5.000.000
	Rotavirus	Diarréia, vomito	4.000-850.000
Protozoários	<i>Cryptosporidium parvum</i> oocysts	Diarréia	1-390
	<i>Entamoeba histolytica</i>	Disenteria	4
	<i>Giardia lamblia</i> cysts	Diarréia	125-200.000
Helmintos	<i>Ascaris</i> spp.	Ascariíase	5-110
	<i>Ancylostoma</i> spp.	Anemia	6-190
	<i>Trichuris</i> spp.	Diarréia	10-40

Fonte: Adaptado de Yates e Gerba (1998), apud WHO, 2004.

Quadro 2.1 - Patógenos e organismos indicadores comumente encontrados no esgoto bruto.

As substâncias presentes nos esgotos exercem ação deletéria nos corpos de água: a matéria orgânica pode ocasionar a exaustão do oxigênio dissolvido, causando morte da fauna e flora aquática, escurecimento da água e aparecimento de maus odores; é possível que os detergentes presentes no esgoto provoquem a formação de espumas. Os nutrientes exercem uma forte adubação da água, provocando um crescimento acelerado de vegetais microscópicos que conferem odor e gosto desagradáveis. (BRAGA et al., 2002).

Bastos (2003) afirma que organismos patogênicos não se reproduzem fora do organismo do hospedeiro, com exceção de algumas bactérias, temporariamente e em condições extremamente favoráveis. A sobrevivência no solo pode variar desde uma (protozoários) a duas semanas (bactérias e vírus) até meses (ovos de helmintos).

Segundo Souza (2004), Feachem et al., (1983) analisaram vários trabalhos técnicos e concluíram que informações sobre a sobrevivência dos microrganismos patogênicos excretados nos solos diferem, na maioria dos casos, devido a fatores climáticos, variação de cepas e utilização de técnicas analíticas distintas. Todavia, apesar das diferenças encontradas, os autores conseguiram agrupar os dados analisados, conforme Quadro 2.2.

Microrganismos		Um	Período de Sobrevivência	
			Máximo	Habitual
Vírus	<i>Virus entéricos</i>	Dias	100	20
Bactérias	<i>Coliformes Fecais</i>	Dias	70	20
	<i>Salmonella spp</i>	Dias	70	20
	<i>Vibrio cholera</i>	Dias	20	10
Protozoários	<i>Cistos de Entamoeba histolytica</i>	Dias	20	10
Helmintos	<i>Ovos de Ascaris lumbricoides</i>	meses	Muitos	
	<i>Larvas de Ancylostoma duodenale e Necator americanus</i>	Dias	90	30
	<i>Ovos de Trichuris trichiura</i>	meses	Muitos	
Platelmintos	<i>Ovos de Taenia saginata e Taenia solium</i>	meses	Muitos	

Fonte: Adaptado de Feachem et al. (1983), apud Souza, 2004.

Quadro 2.2 – Tempo de sobrevivência de microrganismos no solo sob temperatura ambiente 20 a 30°C

No Quadro 2.3, pode-se verificar os principais contaminantes existentes em um esgoto bruto, o seu significado no processo de tratamento e sua origem.

Contaminante	Significado	Origem
Sól. Sedimentáveis (areia, pedregulho)	Sólidos sedimentáveis podem gerar depósitos de lodo e a condição anaeróbica nos esgotos	Doméstico
Matéria orgânica (DBO)	Degradação biológica que consome oxigênio e pode perturbar o equilíbrio do oxigênio na água de superfície; se o oxigênio na água é consumido em condições anaeróbicas, forma odores, mata os peixes e acontecerá um desequilíbrio ecológico	Doméstico, industrial
Microorganismos Patogênicos	Afeta a saúde pública severamente pela transmissão de doenças como cólera pela água contaminada	Doméstico
Nutrientes (N e P)	Níveis altos de nitrogênio e fósforo na água de superfície favorecem o crescimento em excesso de algas (eutrofização).	Doméstico, rural e industrial,
Micro-poluentes (metais pesados e combinações orgânicas)	Combinações não-biodegradáveis em baixas concentrações podem ser tóxicas, carcinogênicas ou mutagênicas para plantas, animais e seres humanos. Alguns podem ser bioacumulativos em cadeias alimentícias, por exemplo cromo (VI), cádmio, chumbo, pesticidas e herbicidas, e PCBs	Industrial e rural (praguicida)
Sólidos Dissolvidos Totais	Níveis altos podem restringir o uso do efluente para irrigação agrícola	Industrial

Fonte: Metcalf e Eddy Inc., (1991), apud Veenstra et al., 2004.

Quadro 2.3 – Principais contaminantes de esgotos, seus significados e origens.

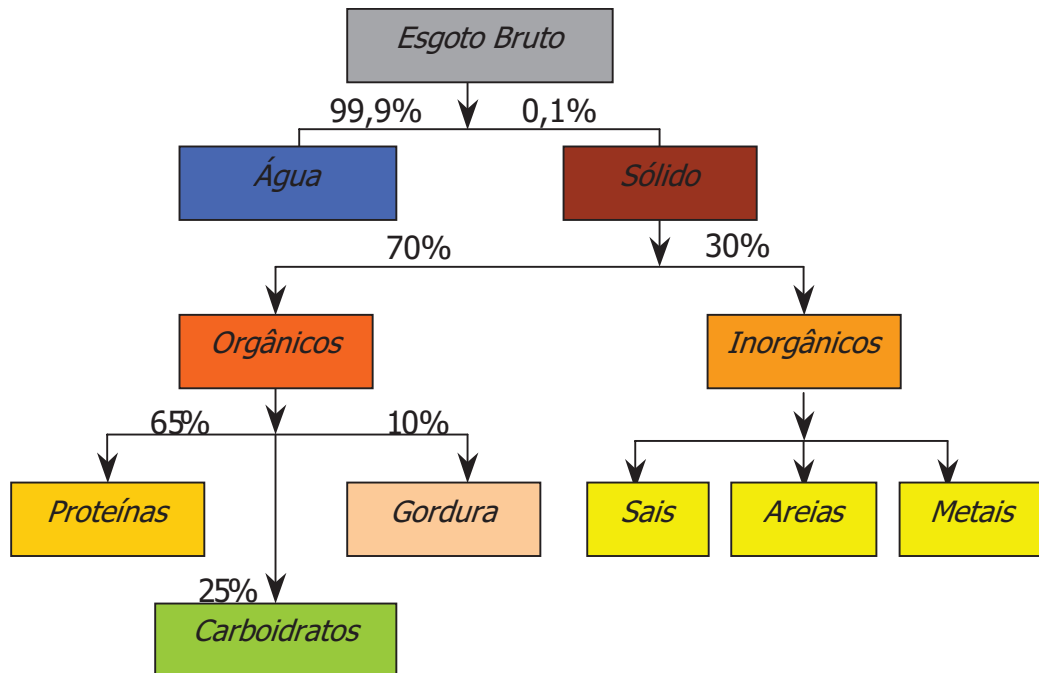
O esgoto não tratado pode possuir milhões de bactérias, que em função do processo de tratamento podem sofrer alterações bioquímicas conduzidas pelos microrganismos (Quadro 2.4). Os tipos fisiológicos de bactérias existentes no esgoto podem mudar durante os estágios de tratamento de esgoto. Esta mudança ocorre em função das condições anaeróbicas e aeróbicas do tratamento.(PELCZAR, 1996).

Substrato +Enzimas de microrganismos	Produtos finais representativos	
	Condições anaeróbicas	Condições aeróbicas
Proteínas e outros componentes orgânicos nitrogenados	Aminoácidos	Aminoácidos
	Amônia	Amônia → nitritos → nitratos
	Nitrogênio	
	Sulfeto de hidrogênio	Sulfeto de hidrogênio→ácido sulfúrico
	Metano	Álcoois
	Dióxido de carbono	Álcoois orgânicos
	Hidrogênio	} →CO ₂ +H ₂ O
	Álcoois	
	Ácidos orgânicos	
	Indol	
Carboidratos	Dióxido de carbono	Álcoois
	Hidrogênio	Ácidos graxos
	Álcoois	} →CO ₂ +H ₂ O
	Ácidos graxos	
	Compostos neutros	
Lipídios e substâncias relacionadas	Ácidos graxos +glicérol	Álcoois
	Dióxido de carbono	Ácidos graxos menores
	Hidrogênio	} →CO ₂ +H ₂ O
	Álcoois	
	Ácidos graxos de cadeia curta	

Fonte: PELCZAR, 1996.

Quadro 2.4 – Esquema generalizado da degradação microbiana dos constituintes orgânicos no esgoto.

Os compostos orgânicos, como as proteínas, os carboidratos e as gorduras, são os principais componentes da parte sólida do esgoto. Estes compostos são o "alimento" das bactérias, utilizadas no processo de tratamento do esgoto. A composição do esgoto está apresentada na Figura 2.1.



Fonte: SANEPAR, 2004.

Figura 2.1 – Composição do esgoto.

Quando o esgoto sanitário é lançado *in natura* nos corpos d'água, pode-se esperar sérios prejuízos à qualidade dessa água. Além do aspecto visual desagradável, pode haver um declínio dos níveis do oxigênio dissolvido, afetando a sobrevivência dos seres de vida aquática, exalação de odores e possibilidade de contaminação de animais e seres humanos pelo consumo ou contato com essa água. Em média, a composição do esgoto sanitário é de 99,9% de água e 0,1% de sólidos, sendo que cerca de 75% desses sólidos são constituídos de matéria orgânica em processo de decomposição. Nesses sólidos, proliferam microrganismos, podendo ocorrer microrganismos patogênicos oriundos das fezes humanas. Podem, ainda, ocorrer poluentes tóxicos, em especial fenóis e metais pesados provenientes da mistura com efluentes industriais. Dada a forte prevalência da água na composição do esgoto, admite-se que suas propriedades físicas são as mesmas da água. (NUVOLARI et al. 2003).

O Quadro 2.5 apresenta os principais constituintes do esgoto doméstico. No entanto, para efeito de tratamento, essas substâncias são tratadas como impurezas da água (sólidos presentes de diferentes granulometrias).

Tipo de Substância	Origem	Observações
Sabões	Lavagem de louças e roupas	-
Detergentes (podem ser ou não biodegradáveis)	Lavagem de louças e roupas	A maioria dos detergentes contém o nutriente fósforo na forma de polifosfato
Cloreto de sódio	Cozinhas e na urina humana	Cada ser humano elimina pela urina de 7 a 15 gramas/dia
Fosfatos	Detergentes e urina humana	Cada ser humano elimina em média pela urina 1,5 gramas/dia
Sulfatos	Urina humana	-
Carbonatos	Urina humana	-
Uréia, amoníaco e ácido úrico	Urina humana	Cada ser humano elimina de 14 a 42 gramas de uréia /dia
Gorduras	Cozinhas e fezes humanas	-
Substâncias córneas, ligamentos da carne e fibras vegetais não digeridas	Fezes humanas	Vão se constituir na porção de matéria orgânica em decomposição encontrada nos esgotos.
Porções do amido (glicogênio, glicose e de protéicos (aminoácidos, proteínas, albumina)).	Fezes humanas	Idem
Urobilina, pigmentos hepáticos, etc.	Urina humana	Idem
Mucos, células de descamação epitelial	Fezes humanas	Idem
Vermes, bactérias, vírus, leveduras, etc.	Fezes humanas	Idem
Outros materiais e substâncias: areia, plásticos, cabelos, sementes, fetos, madeira, absorventes femininos, etc.	Areia: infiltração nas redes de coleta, banhos em cidades litorâneas, parcela de águas pluviais, etc. Demais substâncias são lançadas indevidamente nos vasos sanitários	
Água	-	99,9 %

Fonte: NUVOLARI, 2003.

Quadro 2.5 – Principais constituintes do esgoto doméstico.

A Tabela 2.1 apresenta as características típicas de esgotos predominantemente domésticos, descritas por Von Sperling, (1996).

Tabela 2.1 – Características químicas e biológicas dos esgotos domésticos

Parâmetro	Concentração		
	Unidade	Faixa	Típica
Sólidos Totais	mg/L	700 - 1350	1100
Sólidos Suspensos	mg/L	200 - 450	400
Sólidos Sedimentáveis	mg/L	10 - 20	15
DBO ₅	mg/L	250 - 450	350
DQO	mg/L	450 - 800	700
DQO/DBO ₅	-	1,7 - 2,4	2
Nitrogênio Total	mg/L	35 - 70	50
Nitrato	mg/L	0 - 2	≈ 0
Fósforo Total	mg/L	5 - 25	14
pH	mg/L	6,7 - 7,5	7,0
Alcalinidade	mg/L	110 - 170	140
Cloretos	mg/L	20 - 50	35
Coliformes Totais	org/100mL	10 ⁶ - 10 ⁹	-
Coliformes Fecais	org/100mL	10 ⁵ - 10 ⁸	-
Bactérias Totais	org/100mL	10 ⁹ - 10 ¹⁰	-

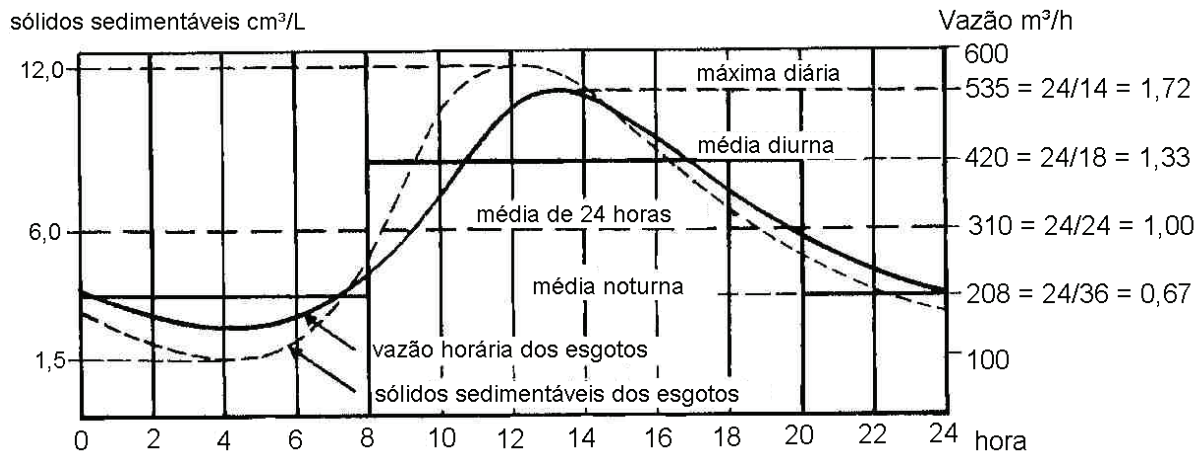
Fonte: VON SPERLING, 1996.

Basicamente, os esgotos urbanos contêm detritos orgânicos, restos de alimentos, sabão, detergentes, carboidratos, gorduras, material protéico, fosfatos e bactérias. A contaminação das águas por esgotos urbanos traz consigo dois grandes problemas: a) contaminação por bactérias, em parte patogênicas para o homem; b) contaminação por substâncias orgânicas degradáveis por bactérias. (COSTA et al., 2004).

O uso domiciliar da água pode acrescentar elevados teores de sais e de sólidos dissolvidos orgânicos, resultado da própria dieta humana e da intensa utilização de produtos de limpeza. Os solos atingidos pela sodicidade destes esgotos sofrem alterações de permeabilidade, pois a alta salinidade aumenta a velocidade de infiltração. (BASTOS, 2003).

Os dejetos provenientes do homem e de animais, representam a principal fonte de contaminação da água, além do solo e vegetais. Os microrganismos patogênicos podem transmitir doenças que atingem principalmente o trato gastrointestinal, levando a sintomas que vão, desde uma simples dor de cabeça até à febre tifóide. (RICHTER apud MACÊDO, 2000).

Segundo Imhoff (1996), o teor de impurezas no esgoto varia durante as 24 horas do dia, assim como as vazões. Geralmente, as vazões máximas e a carga poluidora são verificadas nas proximidades do meio dia, como apresentado na Figura 2.2.



Fonte: IMHOFF, 1996.

Figura 2.2 – Variação da vazão e do teor de sólidos sedimentáveis dos efluentes de uma cidade de 50.000 habitantes, durante as 24 horas do dia.

2.2 Lagoas de Estabilização

Segundo Von Sperling (2002), os sistemas de lagoas de estabilização constituem-se na forma mais simples para o tratamento de esgotos. Há diversas variantes dos sistemas de lagoas de estabilização, com diferentes níveis de simplicidade operacional e requisitos de área. De maneira geral, as lagoas de estabilização são indicadas para regiões de clima quente e países em desenvolvimento, devido aos seguintes aspectos: suficiente disponibilidade de área em um grande número de localidades, clima favorável (temperatura e insolação elevadas), operação simples, necessidade de poucos ou nenhum equipamento.

Com relação à remoção de organismos patogênicos, propriamente ditos, uma série de lagoas, incluindo lagoas de maturação, é capaz de atingir as seguintes eficiências de remoção (MARA et al., 1992, apud VON SPERLING, 2002):

- bactérias – até 6 unidades logarítmicas¹ (99,99%)
- vírus – até 4 unidades logarítmicas¹ (99,99%)
- cistos protozoários: 100%
- ovos helmintos: 100%

¹ A expressão até 6 unidades logarítmicas corresponde a 10^6 , assim como até 4 unidades logarítmicas corresponde a 10^4 .

Alguns aspectos devem ser analisados ao selecionar a área para a implantação de lagoas de estabilização: o nível do lençol freático, o qual pode determinar o nível de assentamento das lagoas e a necessidade de impermeabilização do fundo; e o tipo de solo, o qual tem grande influência na impermeabilização do fundo das lagoas.

O fundo das lagoas de estabilização não deve possuir uma permeabilidade excessiva, que possa causar:

- contaminação do lençol freático;
- dificuldade na manutenção do nível do líquido nas lagoas.

Com frequência, os possíveis locais de implantação de estações de tratamento de esgotos se situam em brejos, áreas alagadiças ou com elevado nível do lençol freático. A permeabilidade do fundo tende a diminuir com o tempo, em função da colmatação ocasionada pelos sólidos do esgoto e pela biomassa. Segundo Arceivala (1981, apud Von Sperling, 2002), em condições favoráveis, as perdas por infiltração são da ordem de menos de 10% da vazão da lagoa, e frequentemente inferiores a 1%.

Mara (1997), propõe as seguintes interpretações do coeficiente de permeabilidade K:

- $K > 10^{-6}$ cm/s: o solo é muito permeável e o fundo deve ser protegido;
- $K > 10^{-7}$ cm/s: alguma filtração pode ocorrer, mas não o suficiente para impedir o enchimento da lagoa;
- $K < 10^{-8}$ cm/s: o fundo da lagoa se impermeabilizará naturalmente;
- $K < 10^{-9}$ cm/s: não há risco de contaminação;
- $K > 10^{-9}$ cm/s: se houver utilização da água subterrânea para o abastecimento doméstico, estudos hidrogeológicos devem ser efetuados.

As lagoas de estabilização podem ser classificadas em três tipos: lagoas anaeróbias, lagoas facultativas e lagoas de maturação. As lagoas anaeróbias são lagoas com profundidades da ordem de 3 a 5 metros, cujo objetivo é minimizar, ao máximo, a presença de oxigênio para que a estabilização da matéria orgânica ocorra estritamente em condições anaeróbias. A eficiência nesse tipo de sistema poderá atingir até 60% na remoção de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) dependendo da temperatura. As lagoas facultativas são lagoas com profundidade de 1,5 a 3 metros. Neste tipo de lagoa ocorrem 2 processos distintos: aeróbios e anaeróbios. Na região superficial ocorre o processo fotossintético realizados pelas algas onde há liberação de oxigênio no meio, favorecendo o processo aeróbio e, no fundo, quando a matéria orgânica tende a sedimentar, ocorrem os processos anaeróbios. As lagoas de maturação são lagoas com profundidades de 0,8 a 1,5 m e sua principal função é remover

patogênicos devido à boa penetração de radiação solar, elevado pH e elevada concentração de oxigênio dissolvido. (CASAN, 2003).

As lagoas de estabilização são mais eficientes para a remoção da matéria orgânica e também são os métodos mais simples e baratos. Nada mais é que um reservatório para reter o esgoto até que se torne estável através da decomposição biológica. A tubulação vinda da rede de esgoto pública passa pelas grades e retira os agentes de maior tamanho do esgoto. Depois o esgoto vai para as caixas de precipitação da areia, sendo, após isso, bombeado para as lagoas que vão recebe-lo para a retenção. Estas lagoas devem ser construídas fora do perímetro urbano porque exalam odores desagradáveis. Um projeto de lagoas de estabilização é composto por uma série de reservatórios. Sendo o primeiro denominado lagoa anaeróbia, com uma profundidade de, mais ou menos, de três metros, o qual retém o esgoto por cinco dias. Não tem oxigênio livre e o líquido é negro. Durante os cinco dias ocorre um processo de respiração anaeróbia pelos microorganismos do esgoto, o que diminui em 50% a carga de matéria orgânica do efluente. Será formado, então, o lodo por sedimentação dos sólidos e, após este período, o esgoto é lançado na lagoa aeróbica (ou de maturação). A lagoa de maturação tem profundidade média de um a dois metros e o efluente fica retido por 15 a 20 dias. Nesta fase, o líquido é mais límpido e a penetração da luz solar, que promove fotossíntese das algas presentes, propicia uma coloração verde na lagoa. Ocorrerá simbiose entre bactérias e algas do esgoto. As bactérias fornecem minerais para as algas, que, por sua vez, produzem oxigênio para promover a oxidação da matéria orgânica e a recuperação da água ou efluente final. Neste sistema de estabilização o tratamento é feito pela luz solar, ar e microorganismos. (PINHEIRO, 2003).

Conforme Mota (1995), a escolha do local para a instalação de uma ETE deve ser criteriosa, de modo que cause o menor impacto ambiental, sendo observadas todas as características relacionadas com os usos do solo e dos recursos hídricos, considerando a bacia como um todo. A disposição dos esgotos em lagoas de estabilização, além de poder causar maus odores, pode resultar na poluição do lençol freático, devido à infiltração do líquido no solo.

Atualmente, aplicam-se materiais industrializados para a impermeabilização do fundo das lagoas, como por exemplo geomembranas que possuem um baixo coeficiente de permeabilidade (10^{-12} e 10^{-15} cm/s), evitando futuras contaminações.

A permeabilidade do fundo das lagoas de estabilização vai diminuindo com o decorrer do tempo, devido a colmatação. (DACACH, 1990).

De acordo com Lue-Hing (1992), a instalação e o tipo de lagoa são influenciados por alguns fatores, tais como:

- Proximidade de áreas residenciais;
- Área de terra disponível;
- Clima;
- Permeabilidade do solo;
- Profundidade da lagoa;
- Quantidade de lodo;
- Características do lodo;
- Nível da água subterrânea;
- Facilidade de retirar o material suspenso.

No Quadro 2.6, pode-se verificar as características típicas do tratamento de esgotos em lagoas de estabilização.

Características Típicas	Lagoa Anaeróbica	Lagoa Facultativa	Lagoa de Maturação
Objetivo	Remoção de Sólidos Suspensos Totais	Remoção de DBO	Remoção de Patógenos e Nutrientes
Taxa	0,1 – 0,3 Kg DBO m ⁻³ d ⁻¹	100 – 350 Kg DBO ha ⁻¹ d ⁻¹	Pelo menos 2 lagoas em série, com 5 dias de detenção
Profundidade Típica	2-5 m	1-2 m	1-1,5 m
Desempenho	SS: 50-70%	SS: aumento	SS: 20-30%
	DBO: 30-60%	DBO: 50-70%	DBO: 20-50%
	Coliformes: 1 ordem de magnitude	Coliformes: 1-2 ordens de magnitude	Coliformes: 3-4 ordens de magnitude
Problemas	Odores	Aumento de Algas	Exigência de área

Fonte: Veenstra et.al, 2004.

Quadro 2.6 - Características típicas de Lagoas de Estabilização.

2.3 Água Subterrânea

As águas subterrâneas podem ocorrer na zona não saturada ou de aeração, onde os interstícios estão parcialmente ocupados por água ou parcialmente por ar; e na zona saturada, na qual os interstícios estão ocupados por água sob pressão hidrostática. Na zona não saturada, a água se move para baixo, sob ação da gravidade, em alguns casos o fluxo pode ser ascendente devido à capilaridade e na zona saturada o movimento depende da formação geológica e das condições hidrogeológicas.

Águas subterrâneas são caracterizadas por um padrão de fluxo fixo em termos de direção e velocidade. As velocidades de fluxo comuns, comumente encontradas em aquíferos, variam de 10^{-10} a 10^{-3} m/s e são direcionadas pela porosidade e permeabilidade do material geológico. (MEYBECK e HELMER, 2004).

As águas subterrâneas constituem a maior reserva estratégica de água doce do planeta, sendo que no Brasil as reservas são estimadas em 112 bilhões de metros cúbicos, com uma disponibilidade de 5.000 m³/habitante/ano. Embora as águas subterrâneas sejam naturalmente mais protegidas dos agentes contaminantes do que as superficiais, a grande expansão das atividades antrópicas, nas áreas urbanas e rurais, tem provocado a poluição pontual das águas subterrâneas, sobretudo através dos lixões, aterros industriais, armazenamento, manuseio e descarte inadequados de produtos químicos, efluentes e resíduos, incluindo o uso indiscriminado de agrotóxicos e fertilizantes. Observa-se, ainda, que os próprios poços tubulares, cisternas e cacimbões, quando construídos sem o devido acompanhamento técnico de profissional capacitado e fora das exigências das normas técnicas, constituem-se em possível fonte de contaminação dos aquíferos, comprometendo a sua qualidade, particularmente, devido à contaminação por agentes biológicos associados à falta de saneamento básico. (CETESB, 2001).

A qualidade das águas subterrâneas depende de processos naturais ou de processos decorrentes das atividades humanas. Segundo Pye e Kelley (1984, apud CHARBENEAU, 1992), existem três formas de ocorrer contaminação das águas subterrâneas. A primeira é por processos naturais, lixiviação em depósitos geológicos que acarretariam em um aumento das concentrações de cloretos, sulfatos, nitratos, ferro e outros componentes inorgânicos. A segunda forma é através das práticas inadequadas de disposição de resíduos líquidos e sólidos, por exemplo, disposição de efluentes industriais e municipais em lagoas, disposição de lodos de esgoto e de processos industriais no solo, disposição de resíduos sólidos no solo, entre

outros. A terceira forma também esta ligada com as atividades humanas, porém, é causada de forma acidental, por exemplo, vazamento e derramamentos de compostos tóxicos, atividades agrícolas, etc.

Segundo Mota (1995), a poluição das águas subterrâneas pode se originar de:

- efluentes de fossas sépticas, infiltrados no solo através de sistemas de absorção (sumidouros ou valas de infiltração);
- líquidos percolados em depósitos de lixo (chorume);
- esgotos lançados no solo em instalações de tratamento tipo lagoa de estabilização ou sistemas de irrigação com águas servidas;
- drenagem de áreas irrigadas (com pesticidas, fertilizantes);
- injeção de resíduos líquidos, domésticos ou industriais, no subsolo;
- infiltração de águas superficiais poluídas;
- intrusão de água salgada;

Águas contaminadas pelo afluxo de sistemas de esgoto ou por resíduos orgânicos apresentam um alto número de bactérias. A água que se move abaixo da superfície do solo passa por uma filtração que remove a maioria dos microorganismos. (TORTORA et al., 2000).

Segundo Pacheco et al. (2003), os sistemas de disposição *in situ*, através das fossas secas e negras, são muito utilizados na periferia das cidades brasileiras, onde a rede de esgoto está incompleta ou não existe. Estes sistemas são considerados como uma das mais importantes fontes pontuais de contaminação das águas subterrâneas por elementos físicos, químicos e microrganismos patogênicos, quando mal implantados e operados. Nas áreas mais baixas, onde o nível de água do freático estiver a menos de cinco metros de profundidade, é inviável este sistema de disposição.

Os aquíferos podem se contaminar através de lagoas de estabilização, rios receptores de resíduos e irrigação com águas servidas. O tipo contaminante será mais perigoso quanto mais móvel e/ou persistente sejam os meios não saturados e saturados. Em regiões muito chuvosas, até mesmo pequenas quantidades de contaminantes podem alcançar rapidamente os aquíferos, através do transporte pelas águas provenientes da chuva e infiltração pelo solo. Para que um contaminante chegue às águas subterrâneas, ele primeiro infiltra-se no solo (na zona não saturada). Muitas vezes, é um processo lento que pode ser chamado de atenuação. Na zona não saturada, através da presença de água, ar e microrganismos, ocorrem reações que podem modificar muitos contaminantes, tornando-os inofensivos ou menos perigosos. Os solos apresentam características e espessuras variáveis de um lugar a outro, nem sempre têm a

mesma eficiência. Dessa forma, quando um determinado contaminante não pode ser degradado pela zona não saturada acaba chegando às águas subterrâneas, que também podem atenuar o contaminante. Porém, a zona saturada é menos eficiente que a zona não saturada. (TRATAMENTO DE ÁGUA, 2003).

De acordo com Szubert (2003), os riscos de poluição das águas subterrâneas dependem das condições hidrogeológicas (características do solo local: permeabilidade e formação, profundidade das águas subterrâneas) e o meio antrópico (concentração humana).

O esgoto tratado, utilizado na agricultura para a irrigação, pode constituir um problema ambiental de considerável magnitude comprometendo as águas subterrâneas, particularmente em zonas áridas, com solos permeáveis e rasos. (BASTOS, 2003).

Costa e Oliveira (2003), afirmam que todas as legislações internacionais são unânimes em adotar medidas prementes e mais rigorosas que a legislação brasileira com relação às águas subterrâneas, uma vez que não desconhecem a importância que os recursos subterrâneos assumem ante o crescente processo de desenvolvimento urbano, agrícola e industrial moderno, os quais causam problemas para a saúde humana em decorrência da qualidade das águas subterrâneas, requerendo a adoção de meios de controle da poluição e da contaminação, considerando-se a necessidade da preservação de um bem natural, que apesar de renovável quando contaminado, para obter-se uma recuperação eficiente, requer tecnologias e custos nem sempre disponíveis.

Burbarelli et al. (2004), concluíram, através de um estudo realizado com a irrigação de efluente de lagoa anaeróbia na cultura de milho, que ocorreu percolação de efluente e conseqüente arraste de microrganismos para o lençol freático.

Segundo Lue-Hing et al. (1992), para monitorar as águas subterrâneas deve-se desenvolver um programa de monitoramento, o qual deve conter as seguintes informações:

- Formação do solo ou rochas do local;
- Direção de fluxo da água subterrânea;
- Profundidade do lençol freático com as variações sazonais;
- Natureza e extensão do lençol freático;
- Profundidade das camadas impermeáveis.

Apresenta-se, no Quadro 2.7, a deteriorização da água subterrânea em conseqüência de alguns contaminantes.

Contaminantes	Água Subterrânea
Patógenos	Deteriorização ocasional ou regional
Sólidos suspensos	Não aplicável
Decomposição da matéria orgânica	Deteriorização ocasional ou regional
Eutrofização	Não aplicável
Nitrato como um poluente	Deteriorização severa ou global
Salinização	Deteriorização severa ou global
Elementos indicadores	Deteriorização importante
Micro-poluente orgânico	Deteriorização severa ou global
Acidificação	Deteriorização rara
Modificação dos regimes hidrogeológicos	Deteriorização ocasional ou regional

Fonte: Adaptado de Meybeck e Helmer, 2004.

Quadro 2.7 - Interferência de contaminantes na qualidade das águas subterrâneas em escala global.

As águas doces superficiais e subterrâneas apresentam concentrações de cloretos na faixa de 3,0 mgCl/L a 83,0 mgCl/L. Os sais de cloreto influenciam na salinidade das águas e, por conseguinte, na sua densidade. Devido a sua solubilidade e estabilidade, o cloreto pode ser prejudicial a vários usos das águas, os esgotos contribuem para o acréscimo de sais de cloreto nos recursos hídricos. (FARIA et al., 2000).

Conforme Pacheco (2003), existe uma escassez de trabalhos detalhados na literatura mundial sobre os impactos dos sistemas de disposição *in situ* nas águas subterrâneas.

2.3.1 Autodepuração

A autodepuração de um curso d'água é a sua capacidade de promover a estabilização de determinada carga poluidora nele lançada. A autodepuração está associada à capacidade de um corpo d'água retornar às condições ecológicas iniciais. Entretanto, isso não ocorre porque haverá a formação de compostos estáveis em concentrações diferentes das anteriormente existentes, ainda que a estabilização seja completa e o oxigênio consumido seja totalmente recuperado. Do ponto de vista sanitário, no entanto, a água estará depurada quando suas características não forem conflitantes com os seus usos preponderantes (UFMG, 2003).

Todo manancial tem capacidade de depurar cargas poluidoras. A autodepuração ocorre através de fenômenos de natureza física, físico-química e biológica. Porém, nem todos os poluentes introduzidos na água são completamente assimilados. Os parâmetros que representam o processo de autodepuração são: a concentração de oxigênio dissolvido na água e o número de microorganismos patogênicos, representado pelo índice coliforme (MOTA, 1995).

A autodepuração ocorre, desde que haja constantemente oxigênio disponível na água, fazendo parte deste fenômeno natural a presença de plantas e animais microscópios de todas as espécies, principalmente as bactérias. (IMHOFF, 1996).

2.4 Solo

Segundo EMBRAPA (1999), solo é uma coleção de corpos naturais constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, formado por materiais minerais e orgânicos, que ocupam a maior parte do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta. Pode ser classificado em várias classes. No caso, serão apresentados os solos utilizados na pesquisa:

Latossolo – solos com avançado estágio de intemperização, muito evoluído, como resultado de enérgicas transformações no material constitutivo. Possui capacidade de troca de cátions baixa, inferior a 17 cmol_c/kg de argila sem correção para carbono. Variam de fortemente a bem drenados, embora ocorram variedades que têm cores pálidas, de drenagem moderada ou, até mesmo, imperfeitamente drenados, transicionais para condições de maior grau de gleização. São, em geral, solos fortemente ácidos, com baixa saturação por bases. São típicos das regiões equatoriais e tropicais, distribuídos em superfícies de erosão, pedimentos ou terraços fluviais antigos, normalmente em relevo plano e suave ondulado. São originados a partir das mais diversas espécies de rochas, sob condições de clima e tipos de vegetação diversos. Possuem cores variando desde amarelas ou mesmo bruno-acinzentadas até vermelho-escuro-acinzentadas (Figura 2.3).



Fonte: EMBRAPA, 1999.

Figura 2.3 – Perfil de LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico.

No Rio Grande do Sul, os Latossolos foram divididos em Vermelhos e Brunos, conforme a cor predominante no horizonte B. Os latossolos vermelhos, com baixa saturação por bases e elevado teor de ferro são distroférricos; quando têm caráter aluminico e elevado teor de ferro são aluminoférricos; e os que apresentam baixa saturação por bases são distróficos. (STRECH et al. 2002).

Gleissolo – solos hidromórficos, constituídos por material mineral, que apresentam horizonte glei dentro dos primeiros 50 cm da superfície do solo. Os solos desta classe são permanentes ou periodicamente saturados por água, salvo se artificialmente drenados. A água de saturação ou permanece estagnada internamente ou a saturação é por fluxo lateral no solo. Em qualquer circunstância, a água do solo pode se elevar por ascensão capilar, atingindo sua superfície. Caracterizam-se pela forte gleização, em decorrência do regime de umidade redutor, que se processa em meio anaeróbico, com muita deficiência ou mesmo ausência do oxigênio, devido ao encharcamento do solo por longo período ou durante todo o ano. O processo de gleização (redução do ferro) implica na manifestação de cores acinzentadas, azuladas ou esverdeadas, devido aos compostos ferrosos resultantes da escassez de oxigênio causada pelo encharcamento (Figura 2.4). São solos mal ou muito mal drenados, em condições naturais. Ocasionalmente podem apresentar textura arenosa nos horizontes superficiais. São solos formados em materiais originários estratificados ou não. São eventualmente formados em áreas inclinadas, sob influência do afloramento de água subterrânea.

Os gleissolos com horizonte superficial (A ou H), com maior espessura e teor de matéria orgânica (por exemplo: horizonte hístico, A húmico, A chernozêmico ou A proeminente), foram classificados como Gleissolos Melânicos, e os que não atendem a estes requisitos são os Gleissolos Háplicos.



Fonte: Oliveira et al., 1992.

Figura 2.4 – Perfil de GEISSOLO MELÂNICO Distrófico hístico.

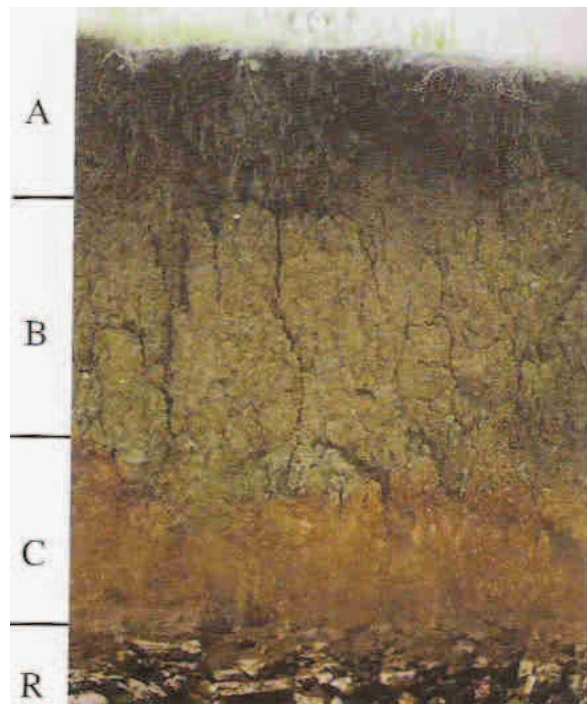
Organossolo – solos pouco evoluídos , constituídos por material orgânico proveniente de acumulações em ambientes mal a muito mal drenados, de coloração preta, cinzenta muito escura ou marrom e com elevados teores de carbono (Figura 2.5). São comumente encontrados nos horizontes H, com grande proporção de resíduos vegetais em grau variável de decomposição. Usualmente, são solos fortemente ácidos, apresentando alta capacidade de troca de cátions e baixa saturação por bases, com esporádicas ocorrências de saturação média ou alta. Ocorrem normalmente em áreas baixas de várzeas, depressões e locais de surgentes.



Fonte: EMBRAPA, 1999.

Figura 2.5 – Perfil de ORGANOSSOLO MÉSICO Sáprico típico.

Em um perfil de solo encontram-se diferentes horizontes (Figura 2.6), os quais estão apresentados com suas características específicas no Quadro 2.8.



Fonte: Streck et al., 2002.

Figura 2.6 – Perfil de solo com seqüência de horizontes pedogenéticos.

Horizonte	Características específicas
A	Horizonte mineral, situado na superfície ou abaixo do horizonte O ou H, apresenta concentração de matéria orgânica decomposta, incorporado por atividade biológica, intimamente misturada com a fração mineral. Tem comumente uma coloração mais escura que os horizontes subjacentes.
E	Horizonte mineral, ocorre abaixo dos horizontes A ou O, apresenta cores mais claras devido à perda de argila, óxidos de ferro ou matéria orgânica que foram transferidos para o horizonte B. Apresenta uma maior concentração residual de areia.
B	Horizonte mineral, formado abaixo dos horizontes E, A ou H, é identificado pela cor mais “viva” (vermelho, amarelo ou cinza), em relação aos horizontes A e C, bem como pela presença de agregados estruturais bem desenvolvidos.
C	Horizonte mineral, situado abaixo do horizonte B ou abaixo do A, quando o B estiver ausente, sendo constituído de rocha alterada.
R	Horizonte mineral de material consolidado, não cortável com uma pá quando úmido; constitui substrato rochoso, podendo ser contínuo ou fendilhado.
O	Horizonte ou camada orgânica superficial constituída de restos orgânicos pouco ou não decompostos, formando um ambiente bem drenado ou ocasionalmente saturado com água.
H	Horizonte ou camada orgânica, superficial ou não, constituída de resíduos orgânicos pouco ou não decompostos, acumulados sob prolongada estagnação de água em áreas de várzea. Pode estar soterrado por material mineral.

Fonte: Streck et al., 2002.

Quadro 2.8 – Horizontes pedogenéticos com características específicas.

No Quadro 2.9 apresenta-se o significado dos horizontes diagnósticos superficiais, que complementam a classificação dos solos.

Horizonte	Significado
Hístico	Representa um ambiente com predominância de material orgânico devido às condições alagadiças (horizonte H) ou elevada umidade (horizonte O).
A húmico	Representa um ambiente de elevada acumulação de matéria orgânica, cores escuras, alta acidez e baixa saturação por bases.
A chernozêmico	Representa um ambiente de baixa lixiviação, baixa acidez e boa fertilidade química, com alta saturação por bases e razoável teor de matéria orgânica.
A proeminente	Representa um ambiente ácido com saturação por bases e com razoável teor de matéria orgânica, condicionado a uma boa estruturação e cores escuras.

Fonte: Streck et al., 2002.

Quadro 2.9 – Significados dos horizontes diagnósticos superficiais.

O solo é formado por três fases: líquida (água com materiais dissolvidos), gasosa (os mesmos gases da atmosfera) e sólida. A fase sólida é composta por partículas minerais de várias formas, tamanhos e características químicas, raízes de planta, populações de organismos macro e microscópios vivos e com metabolismo ativo ou dormente, e matéria orgânica em vários estágios de decomposição. De modo geral, a fase sólida apresenta em torno de 45% do volume total, o espaço poroso (fase líquida e gasosa) 50% e a matéria orgânica 5% (incluindo os organismos vivos), esta proporção pode variar em função do tipo de solo e das condições ambientais.(MOREIRA, 2002).

No solo existem tipos e quantidades de microrganismos que dependem de muitos fatores ambientais, destacando as práticas e eventos que podem introduzir microrganismos no solo, como a aplicação de adubos (esterços) ou dejetos de esgoto. Os microrganismos são essenciais para os processos bioquímicos que reciclam importantes elementos como o enxofre, nitrogênio e carbono. O solo pode também abrigar microrganismos patogênicos que poderão causar doenças.(PELCZAR, 1996).

A microbiota do solo possui uma capacidade limitada para mineralizar resíduos orgânicos, de forma que, se esses forem dispostos no solo de forma excessiva, pode resultar na contaminação do solo. Os resíduos orgânicos antes de serem dispostos no solo, devem passar por tratamento, para reduzir a carga de poluentes, medida normalmente como DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) ou DQO (Demanda Química de Oxigênio). Quando a matéria orgânica é facilmente biodegradável, a relação DQO/DBO tende a 1. Esta relação pode ser usada para estimar a biodegradabilidade relativa de um resíduo orgânico. Uma baixa relação DQO/DBO pode indicar uma alta biodegradabilidade, enquanto uma alta relação pode indicar que o resíduo possui apenas uma pequena parte biodegradável. (CARDOSO et al., 1992).

A ação do solo no processo de tratamento para resíduos, como ocorre na autodepuração dos corpos d'água e nos demais tipos de tratamento, compreende processos físicos, químicos e biológicos de remoção de cada poluente. Esses processos se iniciam imediatamente, a partir do lançamento ao solo, e prosseguem durante a percolação do resíduo. A depuração dos esgotos pode ser conseguida provocando sua infiltração e percolação através do solo. Neste caso, o solo e os microorganismos telúricos atuam na remoção da carga poluidora. (GONÇALVES, 2003).

Conforme Mota (1997), a poluição do solo pode ser entendida como qualquer alteração das suas características provocadas pela introdução de produtos químicos ou resíduos, de forma que prejudique o homem e os outros organismos.

Segundo Braga (2002), as partículas de menor dimensão presentes na fração argilosa dos solos, bem como a matéria orgânica e alguns óxidos, podem apresentar cargas elétricas que repelem ou absorvem íons e radicais, o que denominamos capacidade de troca iônica do solo. Com o excesso de cargas negativas, o solo tem capacidade de troca de cátions – CTC, ocorrendo excesso de cargas positivas mede-se a capacidade de troca de ânions – CTA. Os solos com CTC elevada retêm nutrientes essenciais às plantas como cálcio, potássio e magnésio, não retendo ânions como nitratos e cloretos, passando livremente para as águas do lençol subterrâneo, contaminando-as (águas com mais de 10 mg/L de nitrato podem provocar a metemoglobinemia ou doença azul). Os solos com pH inferior a 5,5 favorecem a solubilização do alumínio, do manganês e do ferro. A acidez reduz a atividade de bactérias decompositoras da matéria orgânica, diminuindo a quantidade de nitrogênio, fósforo e enxofre contidos no solo. Os solos com pH mais elevados (acima de 6,5) reduzem a disponibilidade de vários nutrientes (Zn, Cu, Fe, Mn, B).

A capacidade de troca de cátions e de ânions entre os sólidos e os íons em solução, afeta significativamente o fluxo de contaminantes e está relacionada com a carga eletrostática superficial das partículas do solo (PARAGUASSÚ, 2002).

Segundo Gonçalves (2003), são propriedades do solo extremamente importantes para que este seja usado como local de disposição de esgotos: Capacidade de Troca de Iônica; Poder tampão – a presença de carbonatos e maiores teores de matéria orgânica impedem variações bruscas de pH do solo e minimizam impactos da adição de resíduos; Retenção – característica relacionada ao poder do solo de funcionar como um filtro físico de partículas em suspensão; Microbiologia – Inúmeras interações ocorrem no solo com a disposição de resíduos, a resultante das interações sinérgica ou inibitória definirá o comportamento do solo na depuração do esgoto.

A fração coloidal do solo é representada pelos minerais de argilas e matéria orgânica, que se caracterizam por apresentar cargas elétricas superficiais, as quais podem ser negativas ou positivas. Quando predominam as cargas positivas, estas têm pouco poder de reter elementos químicos dotados de cargas negativas, esse fenômeno denomina-se capacidade de troca de ânions (CTA). Porém, na maioria dos solos brasileiros há predominância de cargas negativas, que absorvem elementos catiônicos, estabelecendo a capacidade de troca de cátions (CTC). (BASTOS, 2003).

O solo é mais que um simples meio físico formado por substâncias minerais e orgânicas, cujas formas predominantemente granulares conferem-lhe as propriedades características como a porosidade, a permeabilidade e a textura. A depuração dos esgotos

pode ser conseguida por meio de mecanismos de ordem física, como sedimentação, filtração, radiação, volatilização, desidratação, ordem química, por meio de reações de oxidação, redução, precipitação, adsorção e troca iônica e biológica, absorção, biodegradação e predação. Assim, o solo e os microrganismos telúricos atuam na remoção da carga poluidora, enquanto a vegetação, se existente, cumpre a função de retirar do solo os nutrientes provenientes dos esgotos, evitando assim as concentrações excessivas e inconvenientes destes elementos. A aplicação de águas residuárias melhora as características físicas e fertilidade do solo. No entanto, é preciso haver um uso racional deste recurso, dado que pode levar, em pouco tempo, a problemas de contaminação por acúmulo de nutrientes, sais solúveis, materiais inorgânicos e orgânicos, e pela lixiviação de nitrato. A disposição de esgotos domésticos em zonas áridas, com solos permeáveis e rasos, caso esta não seja monitorada eficientemente, poderá causar incrementos no nível do lençol freático e poluição por microorganismos patogênicos, e a salinização. (SOUZA, 2004).

Solos orgânicos são os que possuem uma quantidade apreciável de matéria decorrente de decomposição de origem vegetal ou animal, em vários estágios de decomposição. Geralmente argilas ou areias finas, os solos orgânicos são de fácil identificação, pela cor escura e pelo odor característico. A norma D 2487 da ASTM classifica como solo orgânico aquele que apresenta limite de liquidez (LL) de uma amostra seca em estufa menor do que 75% do LL de amostra natural sem secagem em estufa. O teor de matéria orgânica pode ser determinado pela secagem em mufla a 440°C (Norma MB-13.600, da ABNT). Por sua característica orgânica apresentam elevados índices de vazios. (PINTO, 1998).

Conforme Baird (2002), a matéria orgânica dá ao solo a cor escura, sendo constituída principalmente por um material chamado húmus, que deriva principalmente das plantas que realizam fotossíntese. Alguns componentes desse material procedem de uma decomposição anterior, efetuada por organismos que vivem no solo. Os materiais de origem vegetal não-decompostos presentes no húmus são principalmente proteína e lignina, ambas substâncias poliméricas largamente insolúveis em água.

A degradação de diferentes resíduos depende das condições locais e regionais como clima, tipo de solo, vegetação, fauna e microrganismos decompositores. A diversidade bioquímica de substratos macromoleculares indica que os organismos devem possuir amplo espectro de enzimas extracelulares para convertê-los em metabolitos assimiláveis. As propriedades do solo, tais como, teor de argila, pH, teor de matéria orgânica, tensão de água e aeração atuam como fatores ambientais do processo de decomposição. Assim, a complexidade

física e química dos resíduos orgânicos desfavorece a ocorrência de um processo degradativo biologicamente simples. (TAUK, 2004).

O Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) divide os solos em três grandes grupos:

- Solos Grossos – mais de 50% em peso dos grãos são retidos na #200
- Solos Finos – mais de 50% em peso dos solos passam na #200
- Turfas – solos essencialmente orgânicos

Neste sistema de classificação, todos os solos são identificados pelo conjunto de 2 letras, a primeira indicando o tipo de solo e a segunda fornecendo informação complementar a seu respeito.

As 5 letras a seguir indicam o tipos de solos:

- G pedregulho (*gravel*)
- S areia (*sand*)
- C argila (*clay*)
- M silte (*mo - pó em sueco*)
- O solo orgânico (*organic*)

As informações complementares são dadas pelas 4 letras a seguir:

- W bem graduado (*well graded*)
- P uniforme (*poorly graded*)
- H alta compressibilidade (*high compressibility*)
- L baixa compressibilidade (*low compressibility*)

No sistema de classificação HRB, os solos seguem uma ordem de qualidade de A1 a A8.

São também divididos em três grupos:

- Solos Granulares – A1, A2 e A3
- Solos Finos – A4, A5, A6 e A7
- Turfa – A8

Na Figura 2.7 apresenta-se os valores de permeabilidade para os diferentes tipos de solo.

k (cm/s)	10 ²		1	10 ⁻²		10 ⁻⁴		10 ⁻⁵		10 ⁻⁸
Solo	Pedregulhos			Areias		Areias finas siltosas e argilosas, siltes argilosos			Argilas	

Fonte: MELLO; TEIXEIRA, 1967.

Figura 2.7 – Valores de permeabilidade para diferentes tipos de solo.

2.5 Movimento de Poluentes

Segundo Mota (1995), a percolação de poluentes pode ser influenciada por vários fatores:

- tipo de fonte de poluição e natureza dos poluentes que percolam juntos com a água;
- características físicas e químicas do meio geológico: estrutura do solo, permeabilidade, porosidade e composição química;
- tipo de aquífero, modalidade de recarga e características de percolação;
- profundidade do lençol freático;
- fatores hidrológicos: precipitação e infiltração.

A velocidade do movimento das águas subterrâneas depende da permeabilidade do aquífero e do gradiente hidráulico, podendo mover-se verticalmente no aquífero não saturado, ou lateralmente na zona de saturação, sendo que o tipo de movimento influencia na percolação, na distância percorrida e na sobrevivência dos poluentes.

O movimento de águas através do solo reduz os poluentes, por meio dos processos naturais de tratamento como: filtração, absorção, adsorção, decomposição biológica de compostos orgânicos, diluição, dispersão, retenção e morte de microorganismos e outros.

É difícil prever o tempo de sobrevivência e a distância percorrida por um contaminante em um aquífero, mas segundo Mota (1995), algumas conclusões podem ser citadas:

- a depuração é maior na zona não saturada do que na zona de saturação;
- os microorganismos alcançam distâncias inferiores aos poluentes químicos;
- solos com granulometria aberta proporcionam a percolação dos poluentes a distâncias maiores;

- o afastamento entre as cargas poluidoras e as fontes de abastecimento representa um fator importante na proteção da qualidade da água. A distância mínima recomendada entre o nível máximo do lençol freático e o fundo das lagoas de estabilização é de 1,50 metros.

Os aquíferos desempenham duas funções importantes: armazenamento e transmissão. A água subterrânea encontra-se em constante movimento, formando por vezes extensos percursos, porém este movimento é muito lento podendo ser medido em centímetros ou metros por dia, ou até mesmo por ano. A maior parte das águas subterrâneas não contém matéria suspensa, e praticamente nenhuma bactéria, sendo considerada de superior qualidade sanitária. (CETESB, 1974).

O poluente sofre um processo de redução ao entrar em contato com o meio aquático; este processo chama-se diluição. Os corpos d'água apresentam movimentos próprios, que transportam o poluente, sendo este transporte efetuado pela velocidade da água; esse fenômeno é chamado de advecção.

A concentração de substâncias dissolvidas ou em suspensão em meios fluidos é função de processos difusivos, sendo apresentados como difusão molecular, movimento decorrente da agitação térmica das partículas existentes no meio fluído, e; difusão turbulenta, a existência de turbulência no escoamento da água provoca mistura rápida das substâncias presentes. O fenômeno de transporte dos poluentes, causado pela ocorrência conjunta da difusão molecular e/ou turbulenta e da advecção é chamado de dispersão. (BRAGA et al., 2002).

Os ensaios mais utilizados para determinar os parâmetros de transporte, coeficiente de difusão molecular e coeficiente de distribuição são os ensaios de coluna (ROWE et al., 1995 apud BORGES et al., 1997).

São inúmeros os fenômenos que controlam o transporte de contaminantes em meios porosos, onde o contaminante (poluente) move-se com um fluído (água) nos vazios do meio poroso (solo), seja ele saturado ou não. (NOBRE, 1987 apud COELHO et al., 2003).

Segundo Coelho et al. (2003), o movimento de poluentes não depende apenas do fluxo do fluído, no qual essas substâncias estão dissolvidas, mas sim de mecanismos físicos, químicos e biológicos, aos quais estas substâncias são submetidas. Os mecanismos e seus processos estão descritos no Quadro 2.10.

Mecanismos	Processos
Físicos	Advecção, mistura mecânica, dispersão e difusão molecular.
Químicos	Sorção, adsorção-desorção, precipitação-dissolução, óxido-redução, complexação e quelação.
Biológicos	Óxido-redução

Fonte: Coelho et al., 2003.

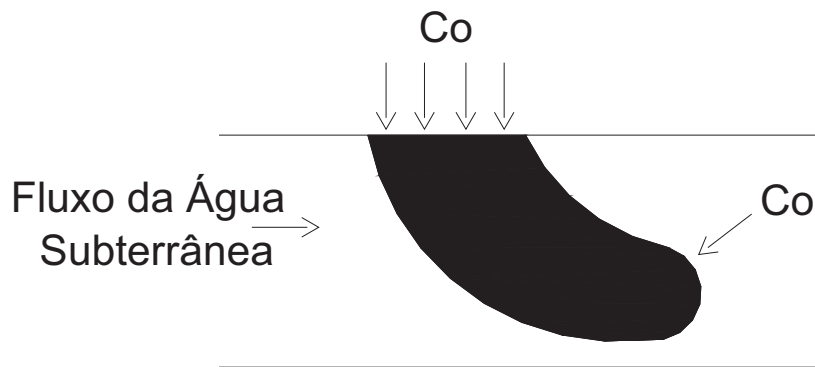
Quadro 2.10 – Mecanismos e processos do movimento de poluentes.

Segundo National Research Council (1990, apud CORREA et al., 2003), são oito os processos que afetam o transporte de contaminantes miscíveis em água:

- Sorção – retenção da parte do contaminante pelas partículas de solo (mais significativa para solos com CTC acima de 10meq/100g);
- Decaimento radioativo – declínio irreversível da atividade radioativa (só é relevante quando a meia-vida do elemento radioativo é menor ou igual ao tempo de retenção do contaminante no meio poroso);
- Dissolução/precipitação – reações devido a liberação de elementos da fase sólida ou remoção de contaminantes com a precipitação no meio poroso;
- Ácido/base – reações envolvendo a transferência de prótons de H^+ ;
- Complexação – combinação de ânions e cátions na forma de novos elementos;
- Hidrólise – reação de compostos orgânicos halogenados com íons da água (torna o composto orgânico mais suscetível à biodegradação);
- Oxidação/redução – reações envolvendo a transferência de elétrons (controla a precipitação de metais);
- Biodegradação – reações controladas por microrganismos (importante nos mecanismos de atenuação de compostos orgânicos).

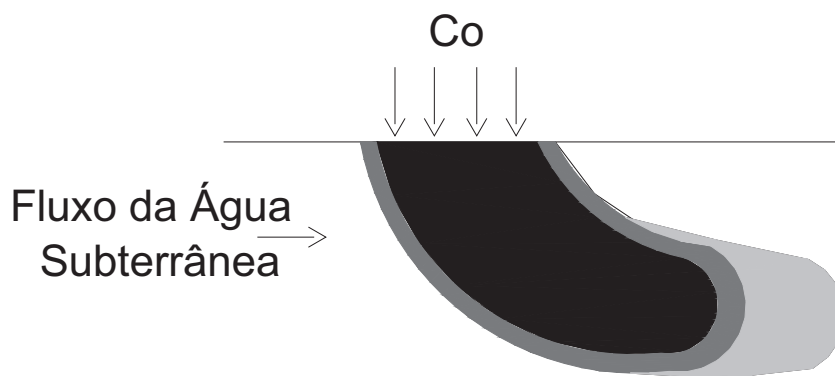
Machado (2003), afirma que existem diversos fenômenos que controlam o transporte de contaminantes pelos solos, sendo difícil e complexo o entendimento de como estas substâncias podem ser mobilizadas e atenuadas. Os mecanismos de transporte de metais pesados no meio porosos se dão através de processos físicos e químicos. O primeiro tipo de processo descreve a movimentação física do contaminante através do espaço poroso e envolve os fenômenos de advecção e de dispersão hidrodinâmica. Já os processos químicos estão relacionados com a interação contaminante-solo.

De acordo com Reddi e Inyang (2000), o transporte de contaminantes miscíveis em água segue o processo de advecção que está relacionado à velocidade de fluxo de água. Se advecção for o único mecanismo de transporte, a velocidade de percolação é um indicador do transporte de contaminantes. Assim, quando uma substância química com uma concentração C_0 é introduzida em um sistema com solo saturado como apresentado na Figura 2.8, migra com uma velocidade igual para a velocidade de percolação V_a . Porém, há outros mecanismos que aumentam a advecção. O solo saturado, além de gradientes hidráulicos, possui gradientes de concentração devido às substâncias químicas dissolvidas. Estes gradientes de concentração exercitam a atividade cinética gerando mecanismos adicionais de transporte, chamado de difusão. O efeito de difusão é de espalhar o contaminante em todas as direções respeitando os gradientes de concentração (Figura 2.9).



Fonte: Reddi e Inyang, 2000.

Figura 2.8 – Transporte de contaminantes por advecção.



Fonte: Reddi e Inyang, 2000.

Figura 2.9 – Transporte de contaminantes por advecção e difusão.

Os mecanismos de advecção e difusão dependem das magnitudes de velocidades e dos gradientes de concentração. Em sistemas onde velocidades são baixas, o processo de difusão predomina. Por outro lado, em sistemas onde as velocidades são altas, predomina a advecção.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve o programa experimental realizado, o qual tem por objetivo verificar a capacidade de atenuação do solo estudado com relação ao contaminante esgoto.

3.1 Programa Experimental

O programa experimental contemplou o projeto dos equipamentos de coluna e colmatação, a montagem destes equipamentos, a validação do equipamento de coluna, a caracterização dos materiais utilizados na pesquisa (dois tipos de solo e esgoto), a medição da vazão do esgoto, a determinação da permeabilidade do solo local, e a realização de ensaios nos equipamentos montados, como apresentado na Figura 3.1.

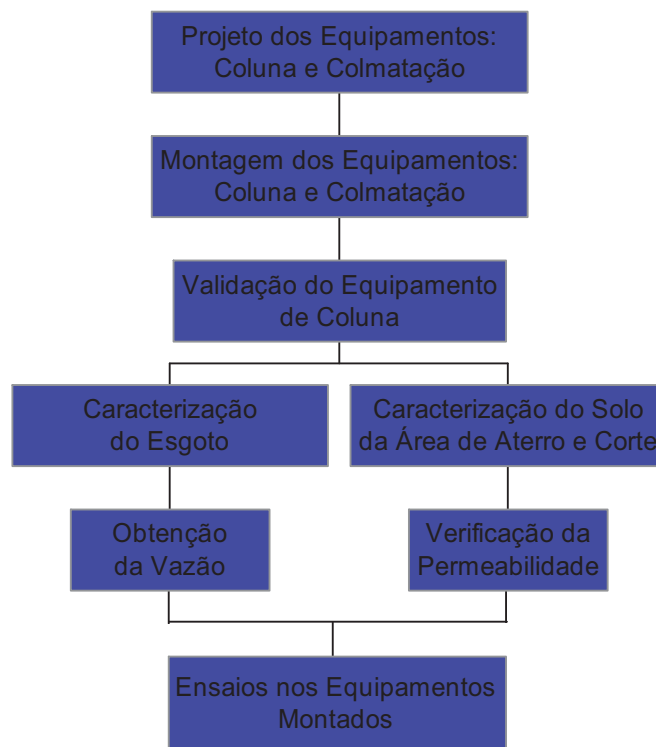


Figura 3.1 – Fluxograma do Programa Experimental.

A seguir, será apresentado no item 3.1.1 o programa de ensaios realizados a partir do item validação do equipamento, apresentado no fluxograma da Figura 3.1. Os itens de projeto e montagem dos equipamentos serão apresentados no capítulo 4.

3.1.1 Programa de ensaios

Inicialmente, foi realizado ensaio para a validação do equipamento de coluna, para tanto foi utilizado um corpo de prova de areia, no qual foi percolado água, com pressões simulando as condições de campo.

Os solos utilizados na pesquisa foram coletados na lagoa anaeróbia da ETE Araucárias, esta lagoa possui áreas de corte e aterro, portanto foram coletadas amostras de solos em ambas as áreas. Foi escolhida a lagoa anaeróbia pelo motivo de que irá receber o esgoto bruto, que passará somente por um processo de gradeamento, com concentrações elevadas de poluição e porque é a mais profunda possuindo maiores pressões.

Os ensaios de caracterização do solo foram realizados para determinar sua classificação pelo Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS) e HRB (*Highway Research Board*). Para a caracterização do solo, com as amostras deformadas, realizou-se os seguintes ensaios:

- Granulometria;
- Limites de consistência (LL, LP e IP);
- Massa Específica (γ_g);
- Umidade (w)
- Análise básica e micronutrientes do solo (percentagem de argila, pH, P, K, Al, Ca, Mg, H+Al, CTC, percentagem de matéria orgânica e S).

Os ensaios realizados no esgoto determinaram as características do esgoto de Passo Fundo, subsidio necessário para comparar este esgoto com dados de bibliografia. O esgoto foi caracterizado levando em consideração os seguintes parâmetros:

Parâmetros Químicos:

- Sólidos Totais
- Sólidos Suspensos
- Sólidos Sedimentáveis
- Matéria Orgânica: DBO e DQO
- Nitrogênio Total

- Nitrato
- Fósforo Total
- pH
- Alcalinidade
- Cloretos

Parâmetros Biológicos:

- Coliformes Fecais

Os ensaios no equipamento de coluna foram realizados para obter os parâmetros de:

- Capacidade de atenuação;
- Condutividade Hidráulica.

Os ensaios no equipamento de colmatação foram realizados para obter os parâmetros de:

- Colmatação do solo;
- Condutividade Hidráulica.

No Quadro 3.1 apresenta-se o número de amostras coletadas e os tipos e números de ensaios realizados para a caracterização dos materiais utilizados na pesquisa.

AMOSTRAS / PARÂMETROS/ANÁLISES	QUANTIDADE
Amostras de solo para caracterização da área de corte	03 coletas
Amostras de solo para caracterização da área de aterro	03 coletas
Amostras do esgoto para caracterização	04 coletas
Limite de Liquidez	06 unidades
Limite de Plasticidade	06 unidades
Índice de Plasticidade	06 unidades
Classificação Granulométrica por Sedimentação	06 unidades
Classificação HRB	06 unidades
Classificação SUCS	06 unidades
Análise físico-química do esgoto para caracterização	04 unidades
Análise microbiológica do esgoto para caracterização	03 unidades

Quadro 3.1 – Número de amostras coletadas e os tipos e números de parâmetros e análises realizadas para a caracterização dos materiais utilizados na pesquisa.

No Quadro 3.2 apresenta-se amostras coletadas e número de ensaios realizados nos equipamentos montados

AMOSTRAS / ENSAIOS/ANÁLISES	QUANTIDADE
Amostras de solo indeformada da área de corte para ensaio de coluna	01 bloco – 03 amostras
Amostras de solo indeformada da área de aterro para ensaio de coluna	01 bloco – 03 amostras
Amostras de solo indeformada da área de corte para ensaio de colmatação	04 amostras
Amostras de solo indeformada da área de corte para ensaio de coluna	04 amostras
Amostras do esgoto para equipamento de colmatação	10 coletas
Amostras do esgoto para equipamento de coluna	06 coletas
Ensaio de validação do equipamento de coluna	01 unidade
Ensaio no equipamento de colmatação	constante
Ensaio no equipamento de coluna	06 unidades
Análise química do esgoto anterior a percolação	06 unidades
Análise química do esgoto posterior a percolação	06 unidades

Quadro 3.2 – Número de amostras coletadas e números de ensaios realizados nos equipamentos montados.

3.2 Descrição da área em estudo

O estudo foi desenvolvido na Estação de Tratamento de Esgoto - ETE Araucárias, localizada no Município de Passo Fundo (Figura 3.2), próximo ao bairro José Alexandre Zacchia, junto à BR 285 (Figura 3.3).

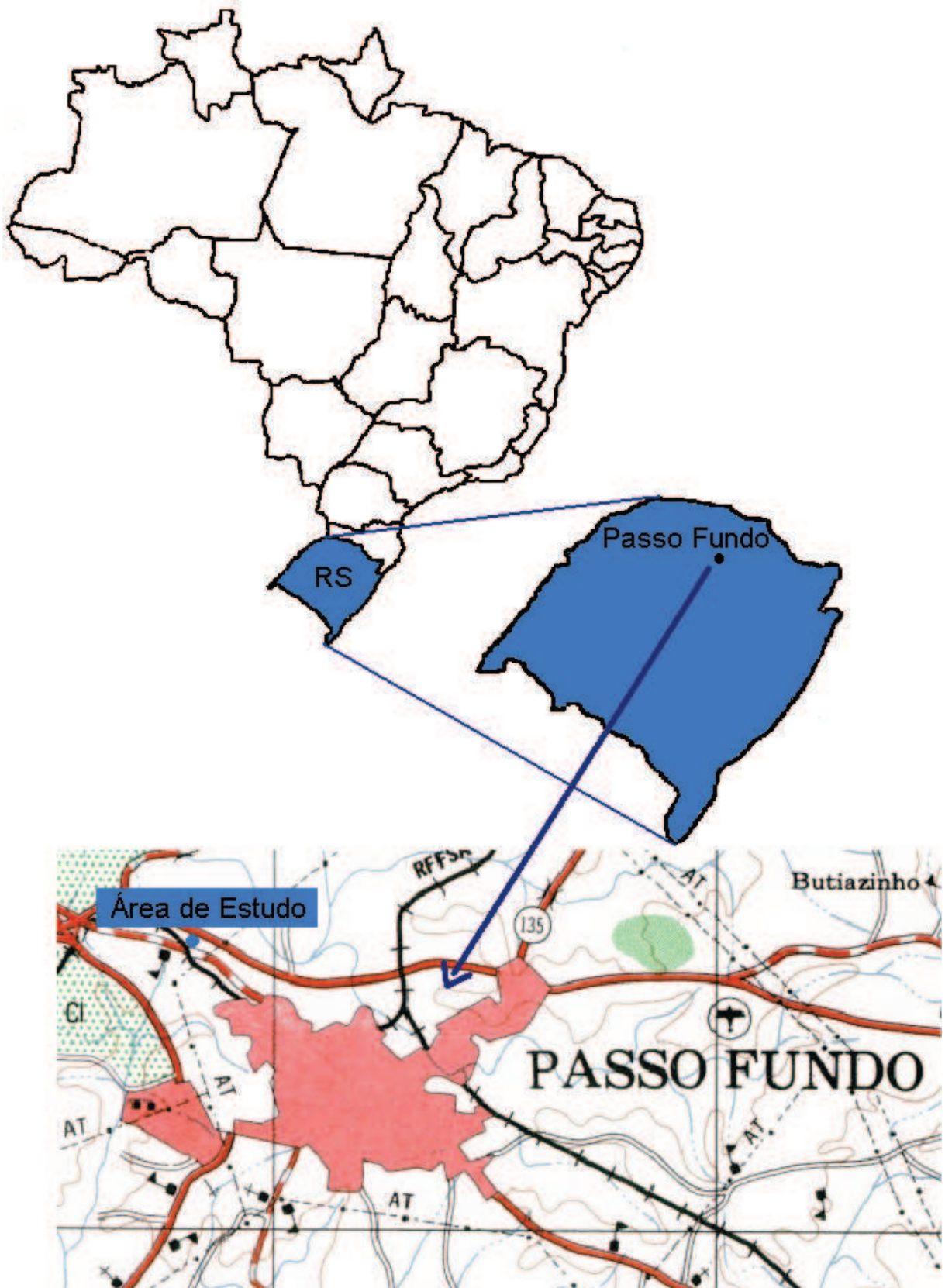


Figura 3.2 – Mapa de situação e localização da Área de Estudo.



Fonte: CORSAN

Figura 3.3 – Local de implantação da ETE Araucárias.

3.2.1 Estação de Tratamento de Esgotos

A obra da Estação de Tratamento de Esgotos Araucárias é responsabilidade da Companhia Riograndense de Saneamento – CORSAN, estando esta paralisada desde o ano de 2001.

A ETE Araucárias possui Lagoas de Estabilização que ocupam uma área de 256.825,93m² (Figura 3.4). A capacidade de tratamento destas lagoas será de 250 l/s, suficiente para tratar o esgoto gerado por aproximadamente 100.000 pessoas. Esta ação, de imediato, beneficiará a população indicada na Figura 3.5.

Após a ampliação da rede de coleta, a ETE Araucárias receberá o esgoto da população das bacias 0, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 19, 22 e 23 indicadas na Figura 3.6.

A ETE Araucárias possui uma lagoa anaeróbia com uma profundidade útil de 2,50m, abrangendo uma área de 38.704,00m²; uma lagoa facultativa com uma profundidade útil de 1,60m, abrangendo uma área de 82.350,00m² e duas lagoas de maturação com profundidade útil de 1,50m, cada uma abrangendo uma área de 29.925,00m².

Inicialmente, os esgotos brutos, após um prévio gradeamento junto à estação elevatória, serão lançados na lagoa anaeróbia, onde serão parcialmente estabilizados. O efluente da lagoa anaeróbia será conduzido à lagoa facultativa, onde a carga orgânica afluyente sofrerá o maior percentual de estabilização e uma sensível redução colimétrica. A etapa final do processo de tratamento se dará nas lagoas de maturação, onde a redução colimétrica tem o maior

significado, embora haja também uma redução na matéria orgânica do efluente. Os módulos foram dimensionados impondo-se uma remoção global média sempre superior a 98,5% no NMP coli/100ml. Em função dessa imposição para o nível colimétrico do efluente final, os módulos propiciarão uma remoção global de matéria orgânica, em termos de DBO₅ da ordem de 87% (informação verbal)².



Fonte: CORSAN

Figura 3.4 – Vista aérea da ETE Araucárias, com as Lagoas de Estabilização.

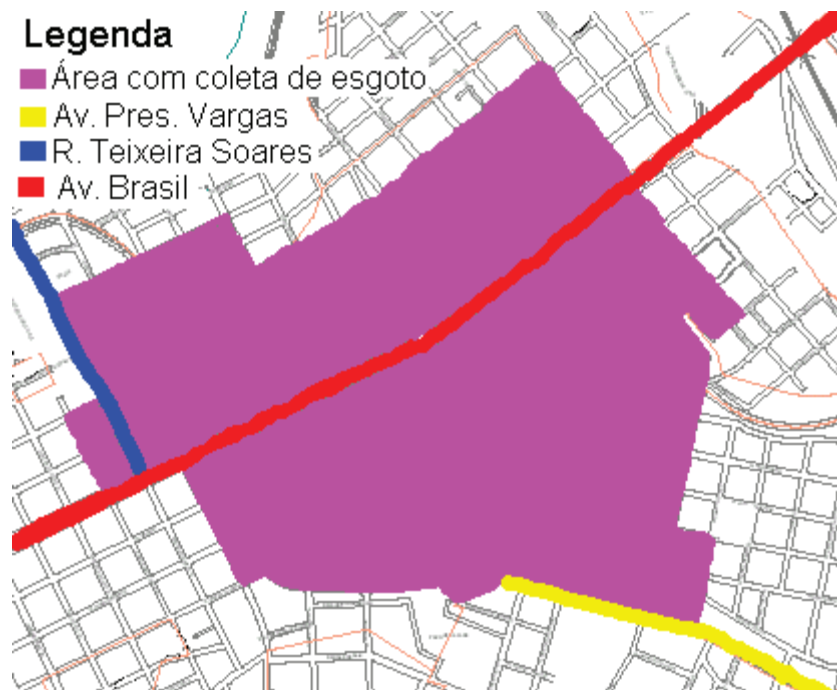


Figura 3.5 – Localização da área atendida inicialmente pela ETE Araucárias.

² Informação verbal fornecida pelo Eng^o da CORSAN Vladimir Rezende de Moura.

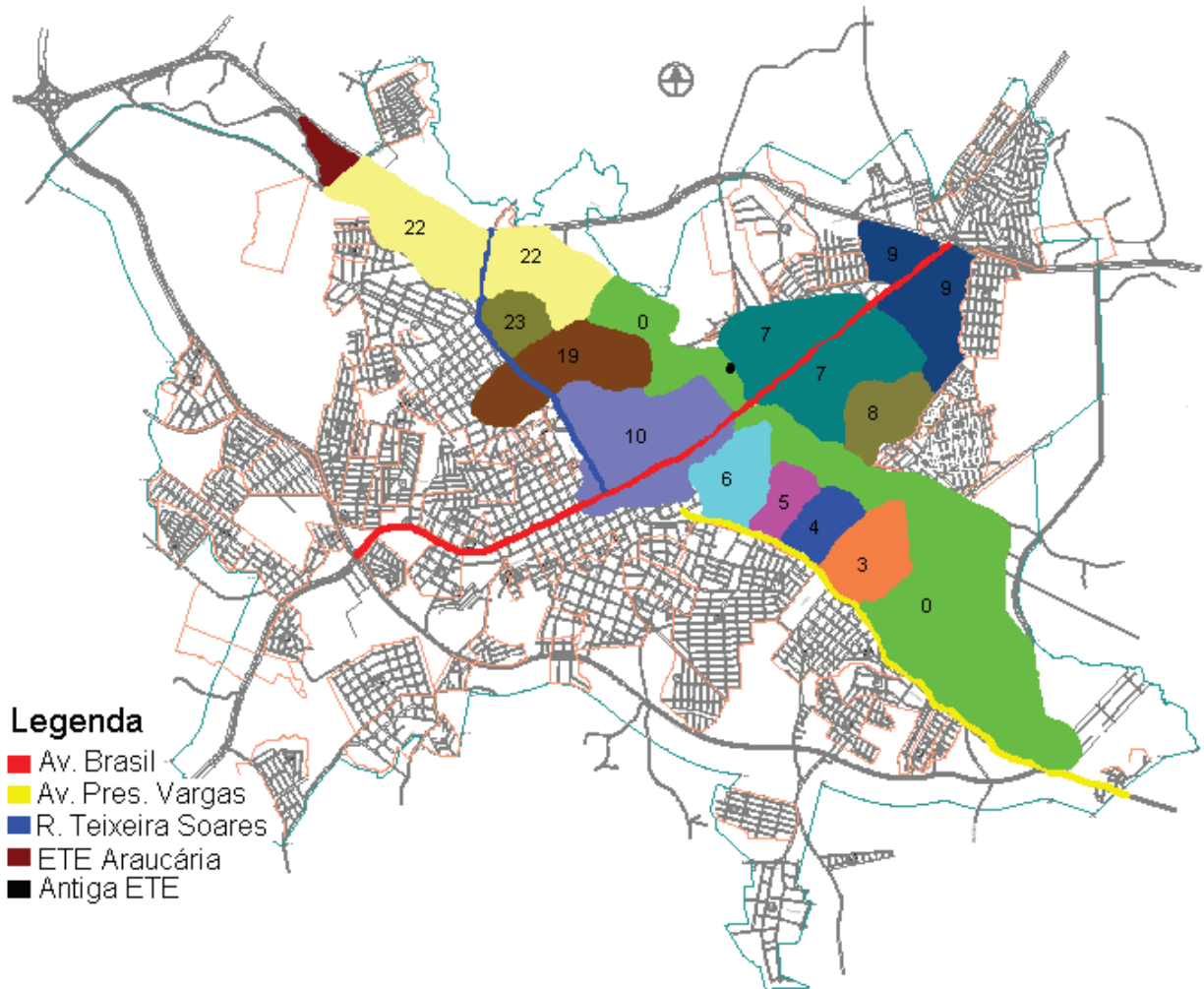


Figura 3.6 – Localização das bacias atendidas pela ETE Araucárias após ampliação da rede de coleta de esgoto.

Na Figura 3.7 estão apresentadas as curvas de nível da área antes da implantação da obra. Os locais do terreno, com cota inferiores a 634, indicam os locais onde se encontram solos moles. Onde as curvas de nível estão com cotas acima de 635, existe a presença de solo residual de arenito da formação Tupaciretã. Também, na Figura 3.7, é colocada uma vista do projeto, onde pode-se observar que a maioria da implantação da obra está sobre solo mole.

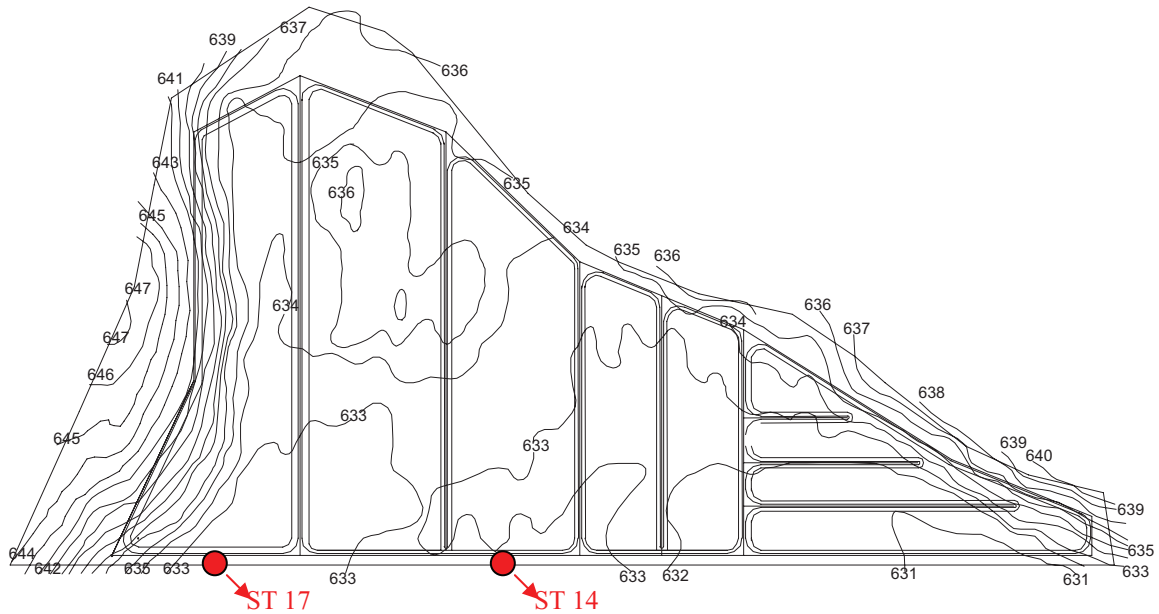


Figura 3.7- Planta Topográfica e localização da ETE na área de implantação.

3.3 Materiais utilizados

3.3.1 Solo

Parte da lagoa anaeróbia foi aterrada com solo da área de empréstimo (Figura 3.4), o restante mantém o solo natural, portanto, nesta lagoa encontram-se dois tipos de solo, como pode-se observar na Figura 3.8, estes solos foram denominados de solo da área de corte (Figura 3.9) e solo da área de aterro (Figura 3.10).



Figura 3.8 – Vista da Lagoa Anaeróbia.



Figura 3.9– Área de corte da Lagoa Anaeróbia



Figura 3.10 – Área de aterro da Lagoa Anaeróbia.

O solo da área de aterro é classificado como um Latossolo Vermelho Distrófico e na área de corte é classificado como um Gleissolo Melânico, com horizonte superficial hístico (H), turfoso.

Nas Figuras 3.11 e 3.12, para fins de ilustração, estão apresentados os perfis do solo natural encontrado, com base nos ensaios de trado, realizados pela Cientec na década de 80. Os perfis apresentados estão localizados na Figura 3.7 e foram chamados de ST 17 e ST 14.

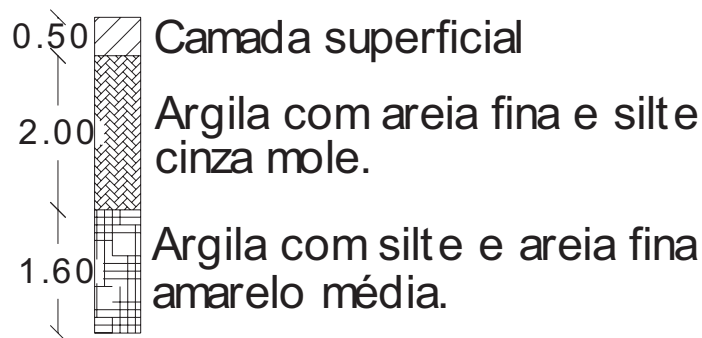


Figura 3.11- Perfil ilustrativo do solo natural - ST 17.

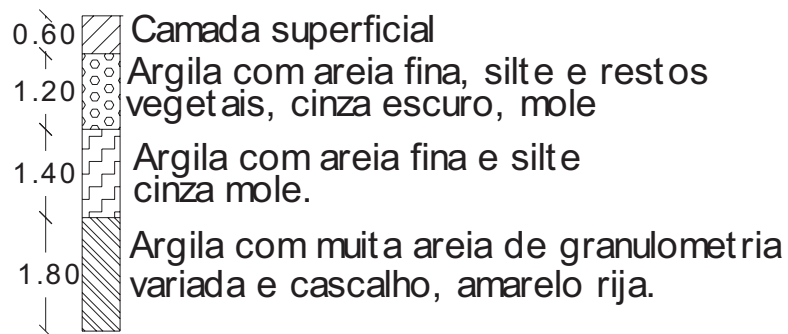


Figura 3.12- Perfil ilustrativo do solo natural - ST14.

3.3.2 Esgoto

As amostras de esgoto para as análises, foram coletadas junto à antiga Estação de Tratamento de Esgotos de Passo Fundo, localizada na Vila Annes (Figura 3.5), a qual está desativada. Atualmente, a referida Estação apenas recebe o esgoto e descarta sem tratamento

no rio Passo Fundo. Futuramente, ela será o ponto de interligação entre as redes de esgotos existentes na cidade e o interceptor que encaminhará o esgoto até a ETE Araucárias (Figura 3.13).



Figura 3.13 – Local de coleta do esgoto na Antiga ETE de Passo Fundo.

3.4 Métodos utilizados

3.4.1 Coleta e classificação dos Solos

Foram coletadas amostras do solo, deformadas para caracterização e indeformadas para o uso no equipamento de coluna e no equipamento de colmatação, da área de corte e da área de aterro da lagoa anaeróbia.

As amostras deformadas da área de corte e da área de aterro foram coletadas através de valas escavadas manualmente, como apresentado nas Figuras 3.14 e 3.15, sendo acondicionadas em sacos plásticos e encaminhadas ao Laboratório de Geotecnia da Faculdade de Engenharia e Arquitetura e para o Laboratório de Solos da Faculdade de Agronomia e Veterinária, ambos da UPF, para que fossem efetuadas as análises de caracterização.



Figura 3.14 – Vala para coleta do solo da área de corte.



Figura 3.15 – Vala para coleta do solo da área de aterro.

Na Figura 3.16, pode-se verificar a vala para a coleta do solo da área de corte e as suas características de cor escura, que geralmente é predominante de solos orgânicos e de solos inundados.



Figura 3.16 – Solo da área de corte.

Na Figura 3.17, pode-se verificar a vala para a coleta do solo da área de aterro e as características de um solo argiloso.



Figura 3.17 – Solo da área de aterro.

Para o equipamento de coluna foram coletadas amostras indeformadas, da área de aterro e da área de corte, através de blocos moldados no local, conforme as Figuras 3.18 e 3.19, sendo que, após retiradas e envolvidas em filme de PVC transparente (Figuras 3.20), foram encaminhadas ao Laboratório de Geotecnia da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da UPF, para posterior confecção dos corpos de prova.



Figura 3.18 –Trincheira para a coleta das amostras indeformadas para o equipamento de coluna da área de aterro



Figura 3.19 –Trincheira para a coleta das amostras indeformadas para o equipamento de coluna da área de corte



Figura 3.20 –Proteção dos blocos de solo utilizados na confecção dos corpos de prova para o equipamento de coluna.

A partir dos blocos, foram moldados os corpos de prova (Figura 3.21), e após, foram acondicionados em sacos plásticos, fechados e armazenados sob refrigeração, para não alterar as características naturais. (Figura 3.22).



Figura 3.21 – Moldagem da amostra indeformada do solo da área de aterro para uso no equipamento de coluna.



Figura 3.22 – Corpos de prova para o equipamento de coluna conservados sob refrigeração.

Os corpos de prova, tanto da área de aterro quanto da área de corte, possuem 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, e estarão submetidos a pressões que simulem as condições de campo (Figura 3.23).



Figura 3.23 – Corpo de prova da área de corte para uso no equipamento de coluna.

Para o equipamento de colmatação, foram coletadas amostras indeformadas da área de corte e aterro, utilizando tubos de parede fina em PVC DN 100, com 30 cm de comprimento,

cravados no solo, conforme exemplificado nas Figuras 3.24 e 3.25, sendo após retiradas e envolvidas em filme de PVC transparente conforme Figura 3.26, e encaminhadas ao Laboratório de Geotecnia da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da UPF.



Figura 3.24 – Cravação dos tubos no solo para coleta das amostras indeformadas para o equipamento de colmatação.



Figura 3.25 – Escavação para a retirada dos tubos para coleta das amostras indeformadas para o equipamento de colmatação.



Figura 3.26 – Amostras indeformadas para o equipamento de colmatação no laboratório.

Foram utilizadas duas formas de coleta para as amostras indeformadas, porque a moldagem de um corpo de prova, através de um bloco com as dimensões necessárias para o equipamento de colmatação, no caso 20 cm de altura, seria mais difícil, visto que para os corpos de prova utilizados no equipamento de coluna que possuem 10 cm já se apresentou dificuldades na moldagem.

Para a classificar os solos da área de aterro e de corte foi necessário inicialmente caracterizá-los, sendo utilizados os seguintes métodos para determinação dos parâmetros:

- Granulometria, realizadas por peneiramento e por sedimentação, segundo o método da NBR 7181/84 (ABNT, 1984);
- Limites de consistência (LL, LP e IP) do solo, de acordo com os métodos da NBR 6459 (ABNT, 1984c) e NBR 7180 (ABNT, 1984d);
- Massa Específica (γ_g), realizada seguindo a NBR 6508 (ABNT 1984)
- Umidade (w), obtida através da secagem do solo em estufa a 105°C.
- Porosidade
- Análise básica e micronutrientes do solo (percentagem de argila, pH, P, K, Al, Ca, Mg, H+Al, CTC, percentagem de matéria orgânica e S), seguindo a metodologia proposta por Tedesco et al., (1995).

3.4.2 Coleta e caracterização do esgoto

O esgoto foi coletado, para a caracterização, em períodos de estiagem, quando se encontra mais concentrado, pois o volume das águas pluviais é menor. O esgoto foi acondicionado num recipiente de vidro escuro (Figura 3.27) e, após a coleta as amostras foram encaminhadas ao LACE (Laboratório de Análise de Controle de Efluentes), para serem efetuadas as análises.



Figura 3.27 – Coleta do esgoto para a caracterização.

As amostras de esgoto, utilizadas no equipamento de coluna, foram coletadas no horário de maior vazão, procurando atender aos períodos de estiagem. As vazões foram medidas durante 2 dias, a cada 2 horas, das 8:00 as 18:00 hs, em meses diferentes, na calha Parshal, existente na antiga ETE (Figura 3.28). As amostras foram filtradas, em um filtro de geotextil, para retirar os sólidos (Figura 3.29), evitando que obstruíssem a tubulação do equipamento de coluna. O esgoto filtrado foi acondicionado num recipiente de vidro escuro, sendo encaminhado ao LACE (Laboratório de Análise de Controle de Efluentes), para serem efetuadas as análises e ao Laboratório de Geotecnia, para ser utilizado no equipamento de coluna.

O esgoto foi caracterizado seguindo o método de análise de referência do *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (APHA,1995).



Figura 3.28 – Medição da Vazão na calha Parshal.



Figura 3.29 – Coleta do esgoto para o equipamento de coluna.

As amostras de esgoto para o ensaio de colmatação foram coletadas (Figura 3.30) dependendo da necessidade de demanda do equipamento. As amostras foram acondicionadas em recipientes de 200 litros (Figura 3.31). Para as amostras utilizadas neste equipamento não foi necessária a realização de análises do esgoto, visto que não era a intenção, nesse ensaio a avaliação qualitativa.



Figura 3.30 – Coleta do esgoto para o equipamento de colmatação.



Figura 3.31 – Armazenamento do esgoto para o equipamento de colmatação

3.4.3 Permeabilidade do solo

A permeabilidade do solo foi obtida de duas formas, a primeira em campo, através de ensaios de infiltração em cavas e em piezômetros, na área de aterro da lagoa anaeróbia, e a segunda, através dos equipamentos de coluna e de colmatação com amostras indeformadas de solos da lagoa anaeróbia das áreas de corte e de aterro.

A permeabilidade obtida em campo não foi executada na área de corte, porque na época de realização dos ensaios o nível do lençol freático estava aflorando, dificultando o acesso ao local e a realização dos mesmos.

O procedimento do ensaio em cavas foi dividido em duas etapas, conforme indicado por OLIVEIRA e CORRÊA (1996):

Primeira etapa:

Preencheu-se a cava com água até atingir o nível do ensaio, mantido constante durante o transcorrer do ensaio; se escarificou com cuidado o fundo da cava de tempos em tempos, evitando a decantação de elementos finos que podem impermeabilizar o fundo. O ensaio foi acompanhado através de um gráfico de vazão ou volumes acumulados versus tempo, para se decidir pelo término do ensaio. As leituras foram feitas a cada 10 minutos. Durante o ensaio mediu-se a evaporação da água, através de um recipiente de seção conhecida, com um volume de água conhecido, ao terminar o ensaio mediu-se o volume d'água remanescente. A partir do volume evaporado e o tempo de ensaio, pôde-se calcular a evaporação por unidade de área, em função do tempo. O ensaio terminou quando a vazão se manteve constante.

Segunda etapa:

Com a cava seca, ampliou-se a mesma, tomando-se os mesmos cuidados que foram tomados quando da sua abertura inicial. Realizou-se novamente o ensaio, com a cava ampliada, conforme descrito anteriormente.

A cava possui as características indicadas nas Figuras 3.32 e 3.33.

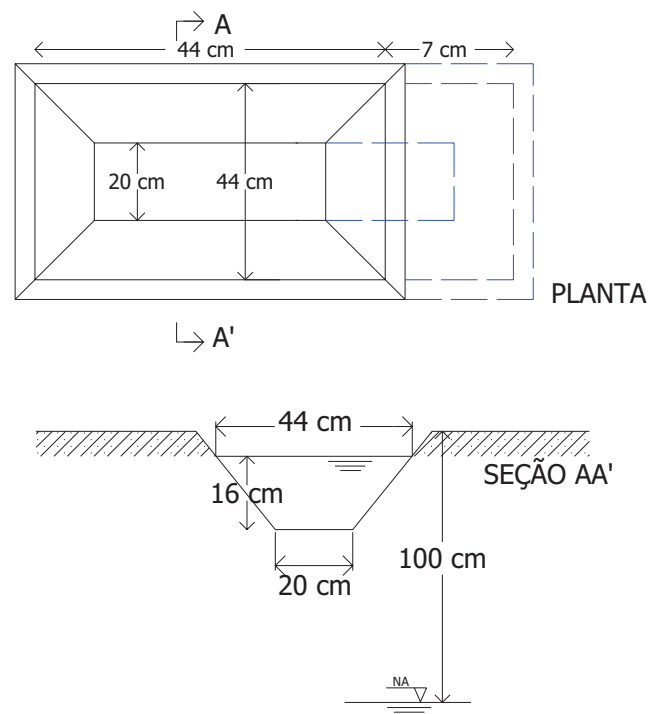


Figura 3.32 – Desenho da execução do ensaio em cavas sem escala.



Figura 3.33 – Foto do ensaio em cavas.

Para a definição do coeficiente de permeabilidade do solo de aterro, através do ensaio em cavas, fez-se uso da seguinte equação desenvolvida, utilizando os valores indicados na Figura 3.32:

$$k = \frac{Q}{L} \times \frac{1}{(B \pm 2H)} \quad (3.1)$$

sendo: k = coeficiente de permeabilidade

Q = vazão

L = comprimento ampliado da cava

B = largura da cava

H = distância entre o fundo da cava e o nível da água

No ensaio de infiltração em piezômetros, o furo foi executado a trado, recebendo uma camada de areia no fundo e nas laterais, um tubo de PVC perfurado no centro e uma camada impermeabilizante (selo) de solo cimento na parte superior do furo, conforme a Figura 3.34.

Após a preparação dos furos, mediu-se a evaporação da água durante a execução do ensaio, da mesma maneira que no ensaio de cavas. Preencheu-se o furo com água até atingir o nível de água do ensaio, este nível foi mantido constante durante o transcorrer do ensaio. Acompanhou-se as vazões infiltradas, por meio de um gráfico de vazão ou volumes acumulados x tempo, para se decidir pelo término do ensaio. As leituras foram feitas a cada 10 minutos. O ensaio terminou quando a vazão se manteve constante.

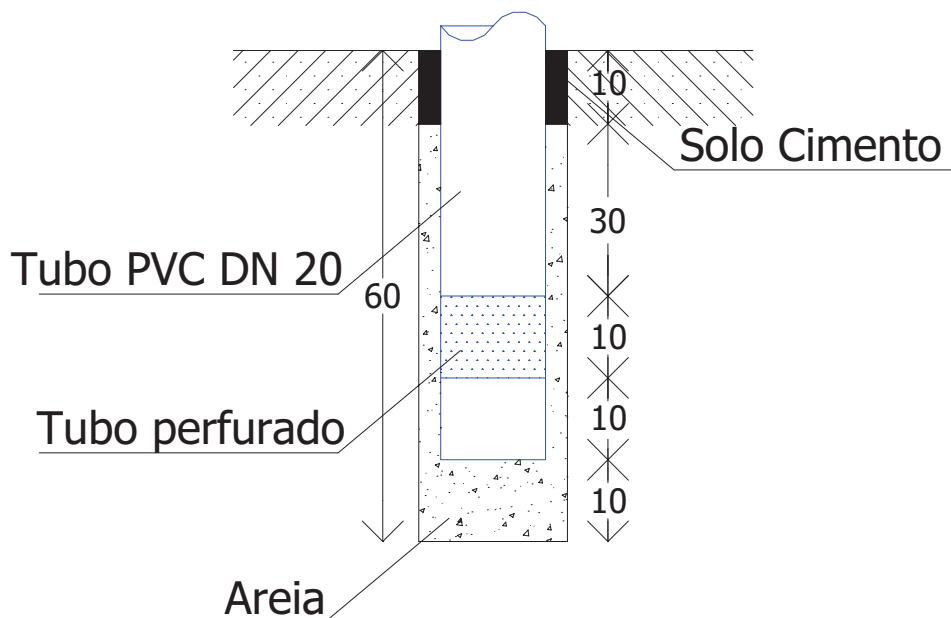


Figura 3.34 – Desenho da execução de ensaio de infiltração.

A Figura 3.35 apresenta o ensaio de infiltração realizado na área de aterro.



Figura 3.35 – Foto do ensaio de infiltração em piezômetro.

Para determinar o coeficiente de permeabilidade no solo de aterro, através do piezômetro, utilizou-se a seguinte equação, com os valores indicados na Figura 3.34.

$$K = \frac{\pi \times d^2 / 4}{F(t_2 - t_1)} \times \ln \frac{H_1}{H_2} \quad (3.2)$$

sendo: k = coeficiente de permeabilidade

d = diâmetro do tubo

F = parâmetro empírico geométrico

H₁ = altura inicial do nível da água

H₂ = altura final do nível da água

$$F = \frac{2 \times \pi \times L}{\ln(L/D + \sqrt{1 + (L/D)^2})} \quad (3.3)$$

sendo: F = parâmetro empírico geométrico

D = diâmetro do furo

L = altura de areia

A segunda forma de obtenção da permeabilidade foi realizada nos equipamentos de coluna e colmatção, com amostras de solo da área de aterro e da área de corte indeformadas em condições controladas, sendo submetidas a ensaios de carga constante.

3.4.4 Ensaio de Coluna

Através destes ensaios obteve-se os parâmetros de:

- Capacidade de atenuação, o qual foi obtido através da análise inicial e final do efluente esgoto que percolou pelas amostras de solo da área de corte e aterro. As análises realizadas foram de DBO₅ e DQO, visto que são os parâmetros que indicam a quantidade de matéria orgânica existente no efluente, que são capazes de contaminar o solo e as águas subterrâneas.
- Permeabilidade, o qual foi obtido através da coleta de dados de tempo de percolação, volume do percolado.

Para obter a permeabilidade dos solos, através do equipamento de coluna, seguiu-se a equação de Darcy, apresentada a seguir.

$$Q = K \times i \times A \quad (3.4)$$

sendo: K = coeficiente de permeabilidade

Q = vazão

A = área superficial da amostra

i = gradiente hidráulico, onde

$$i = \frac{\Delta H}{L} \quad (3.5)$$

sendo: ΔH = diferença da carga hidráulica entre a entrada e a saída do corpo de prova

L = comprimento da amostra

3.4.5 Ensaio de Colmatação

Através do ensaio obtém-se os parâmetros de:

- Colmatação do solo, através da variação da permeabilidade ao longo do tempo, com carga considerada constante.
- Permeabilidade obtido através do equipamento de coluna seguiu a equação de Darcy (Equação 3.4).

4 EQUIPAMENTOS DESENVOLVIDOS

4.1 Equipamento de coluna

4.1.1 Projeto e Montagem

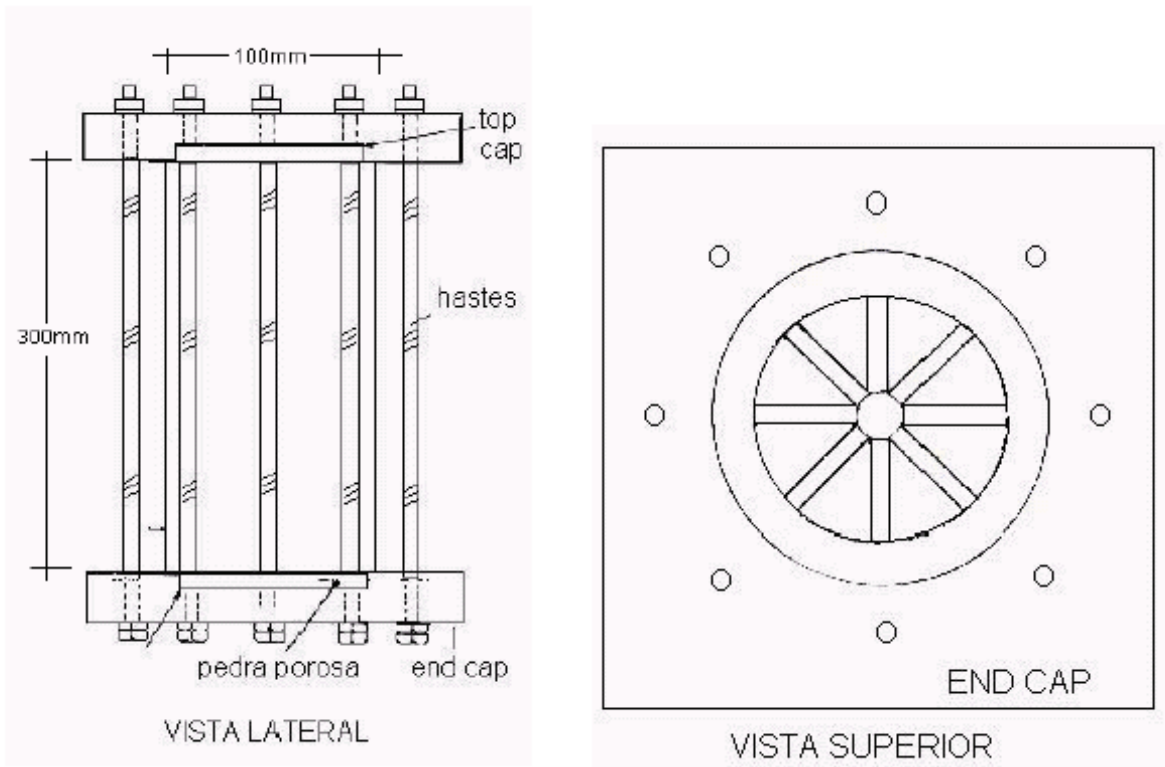
Nesta dissertação foi projetado e desenvolvido um equipamento denominado “Equipamento de Coluna”, seguindo os padrões da norma ASTM D 4874 (1995), com modificações.

A norma ASTM D 4875, *Standard Test Method for Leaching Solid Material in a Column Apparatus*, normatiza o ensaio de percolação, dispondo sobre as informações necessárias à execução do ensaio, por exemplo: equipamento a ser utilizado, reagentes materiais, preparação das amostras, entre outras.

Segundo a norma, o equipamento é composto por duas células cilíndricas (Figura 4.1) sendo uma para o líquido lixiviante (geralmente água) e outra para a amostra compactada. A amostra compactada possui as mesmas dimensões da célula cilíndrica. Os materiais utilizados para a construção e montagem do equipamento devem ser resistentes ao contaminante ou lixiviante empregado, sendo recomendado o uso de vidro ou aço inox.

O equipamento de coluna projetado possui três cilindros, sendo o primeiro para armazenar o líquido contaminado, o segundo para armazenar a amostra de solo e o terceiro para armazenar água, todos em aço inox para evitar reações entre a solução contaminante e o equipamento. Para diminuir a possibilidade de ocorrer fluxo preferencial entre a amostra e a parede do equipamento, quando da percolação do contaminante, foi alterado o diâmetro da amostra, para que esta receba o revestimento de uma membrana, com função de formar uma

parede flexível, ao invés de parede rígida, além de permitir um melhor controle sobre as pressões aplicadas nas amostras.

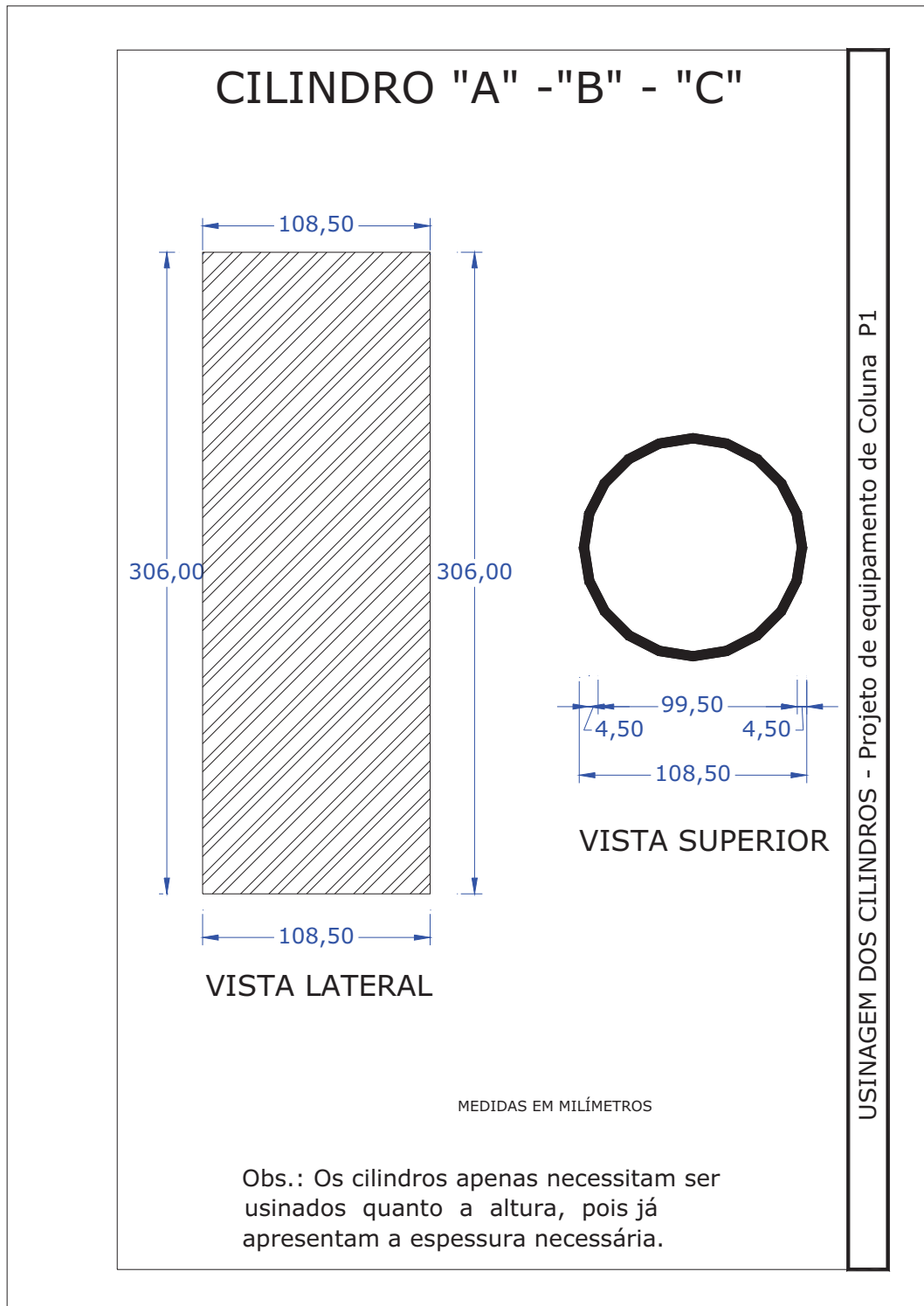


Fonte: Knop (2003).

Figura 4.1 –Equipamento de lixiviação em coluna (ASTM D 4874).

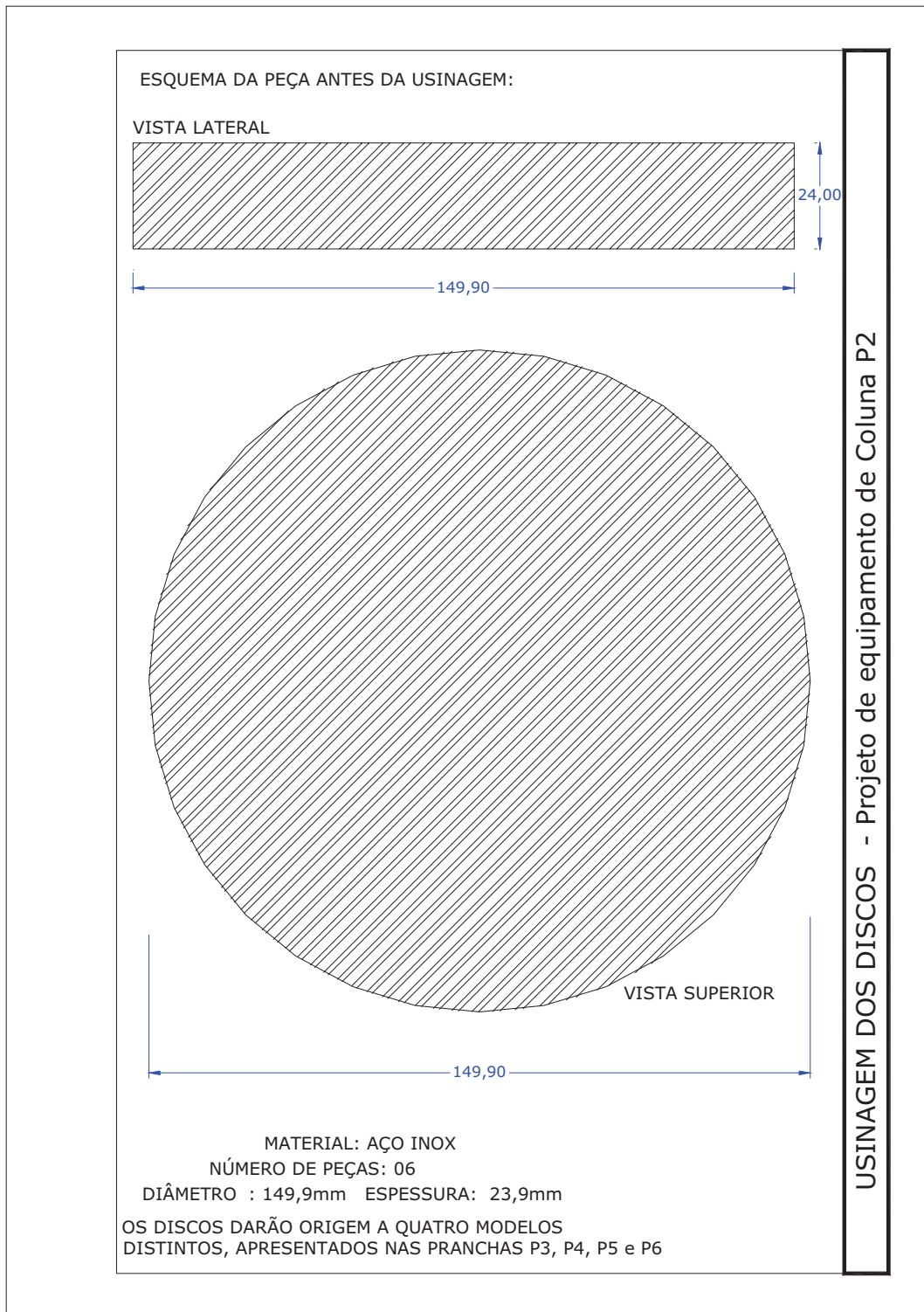
O equipamento de coluna consiste em verificar a capacidade de atenuação de um solo submetido à percolação de um poluente, sendo analisadas as características do poluente antes e após percolação.

Inicialmente, todas as peças do equipamento foram projetadas, (Figuras 4.2 até 4.8) sendo posteriormente encaminhadas à usinagem. O equipamento também permite adotar diferentes pressões de trabalho.



Fonte: Knop (2003).

Figura 4.2 –Projeto dos cilindros do equipamento de coluna.



Fonte: Knop (2003).

Figura 4.3 –Projeto dos discos do equipamento de coluna.

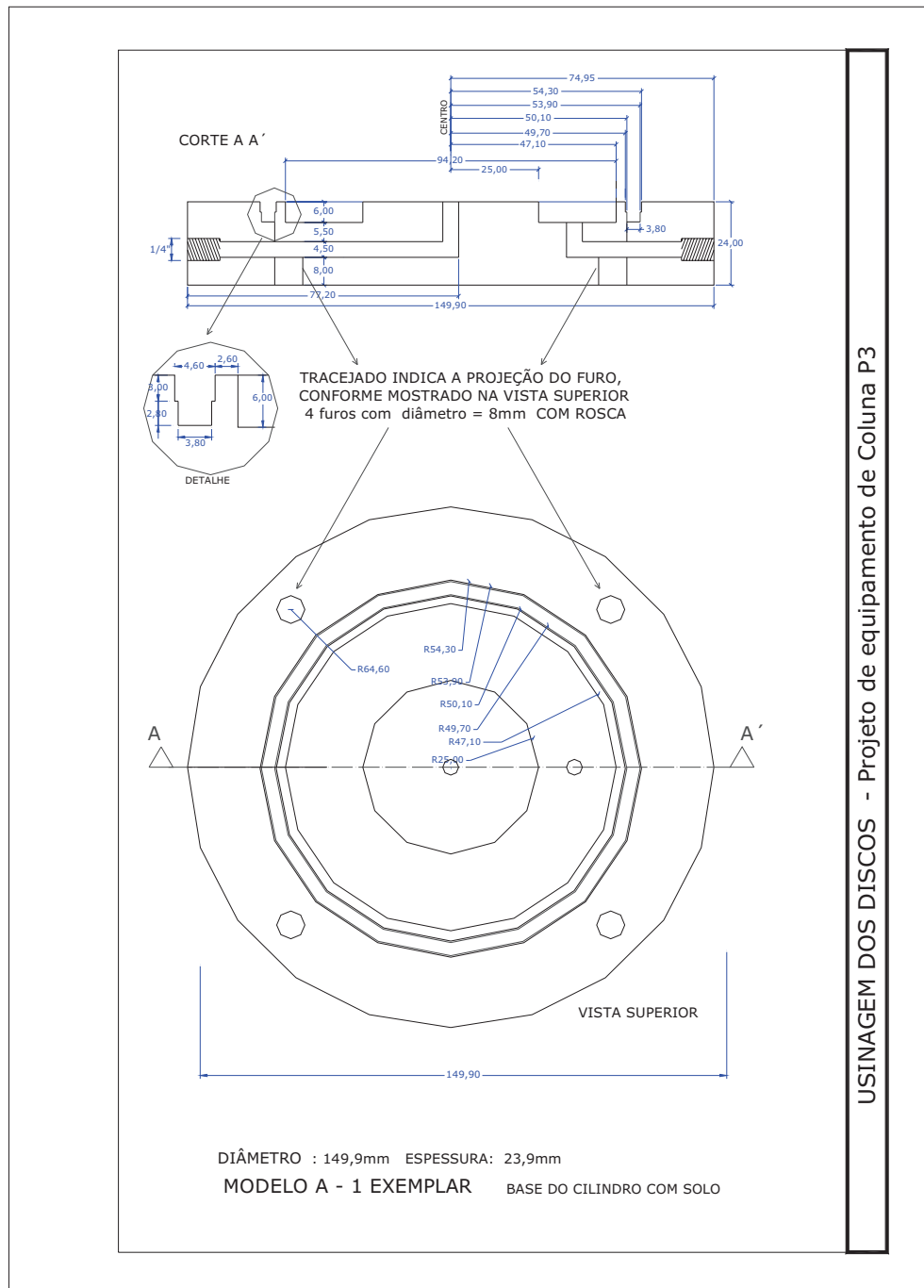
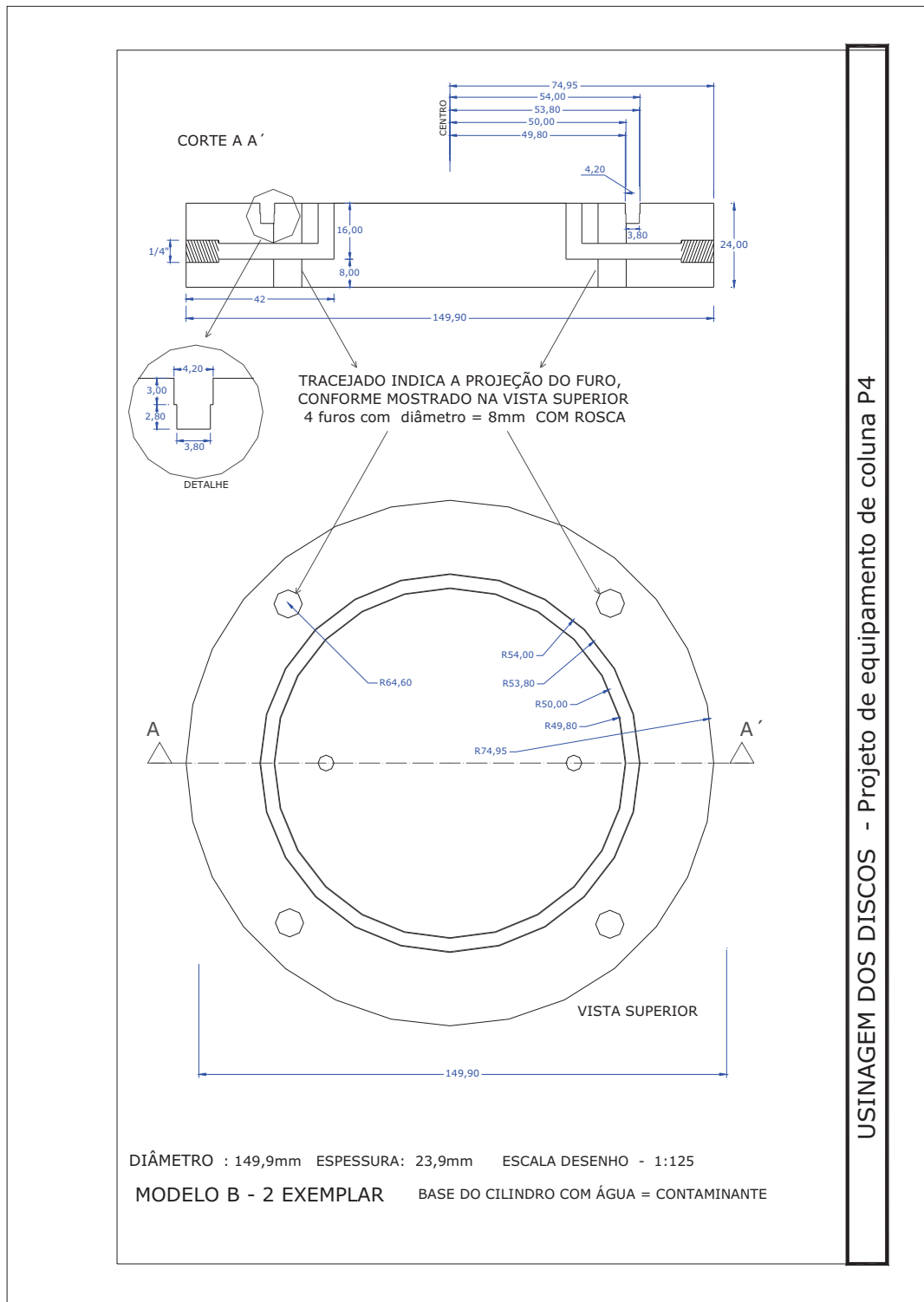
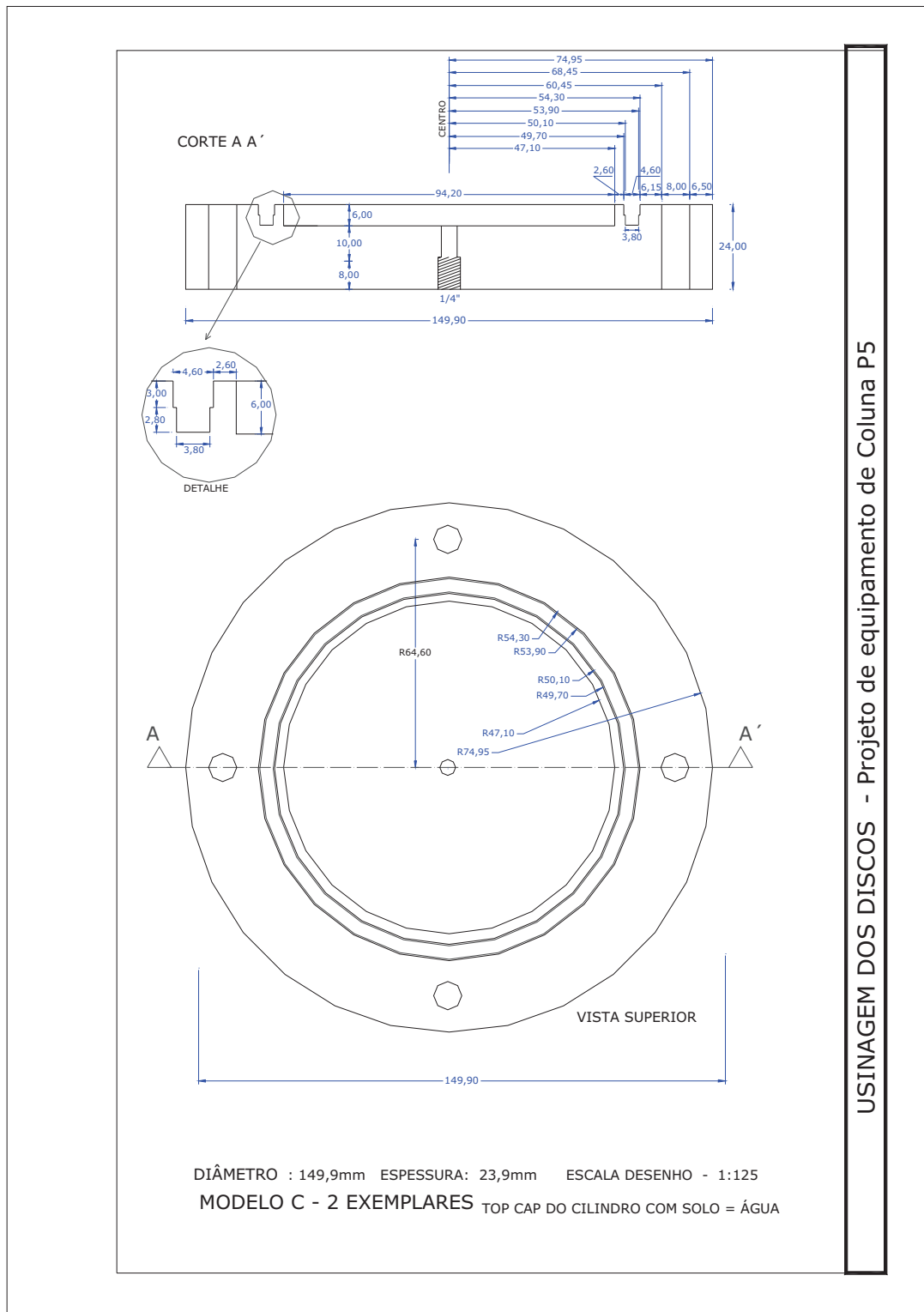


Figura 4.4 –Projeto da base do cilindro com solo do equipamento de coluna.



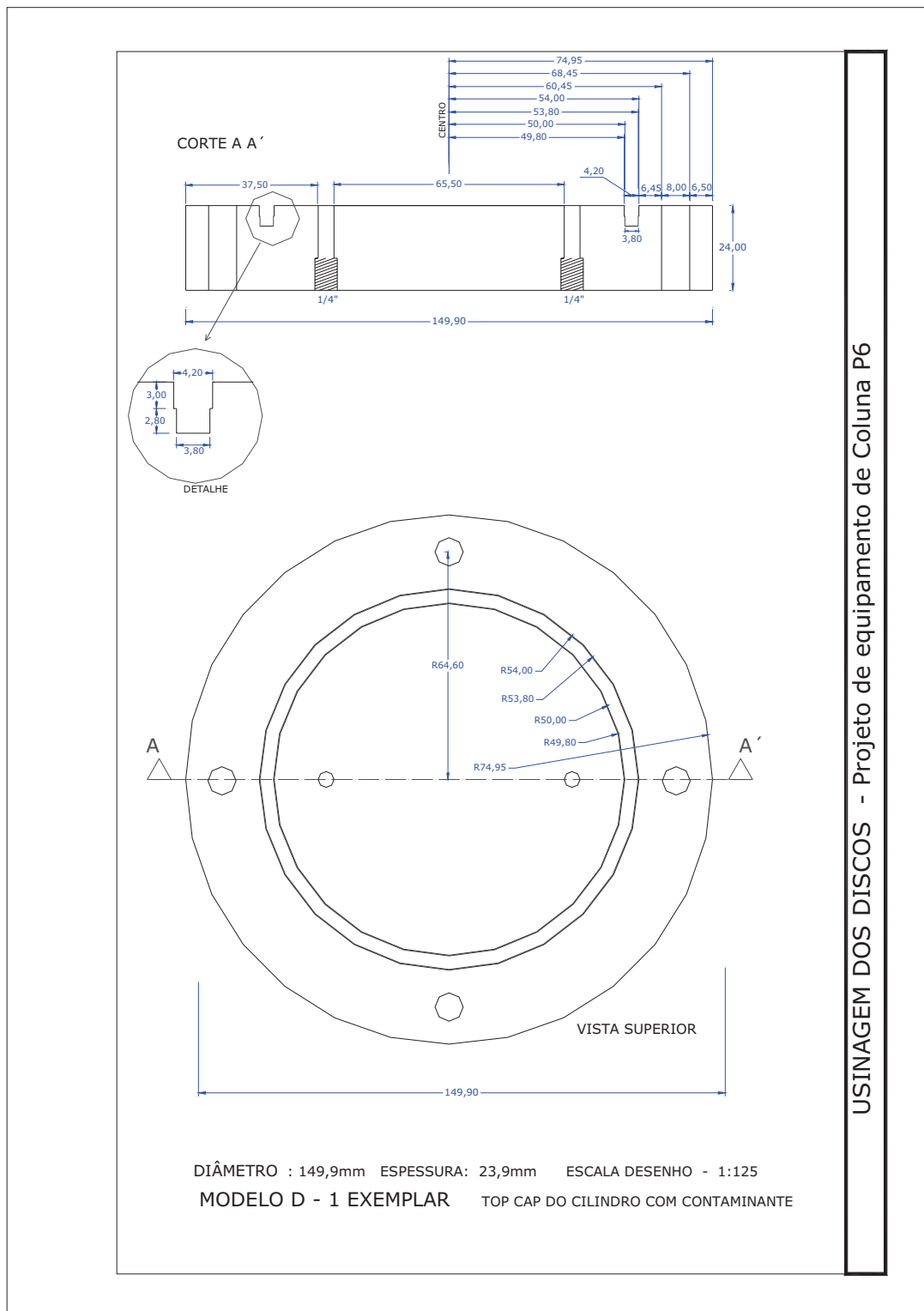
Fonte: Knop (2003).

Figura 4.5 – Projeto da base do cilindro com água e contaminante do equipamento de coluna.



Fonte: Knop (2003).

Figura 4.6 –Projeto do *top cap* do cilindro com solo e água do equipamento de coluna.



Fonte: Knop (2003).

Figura 4.7 –Projeto do *top cap* do cilindro com contaminante do equipamento de coluna.

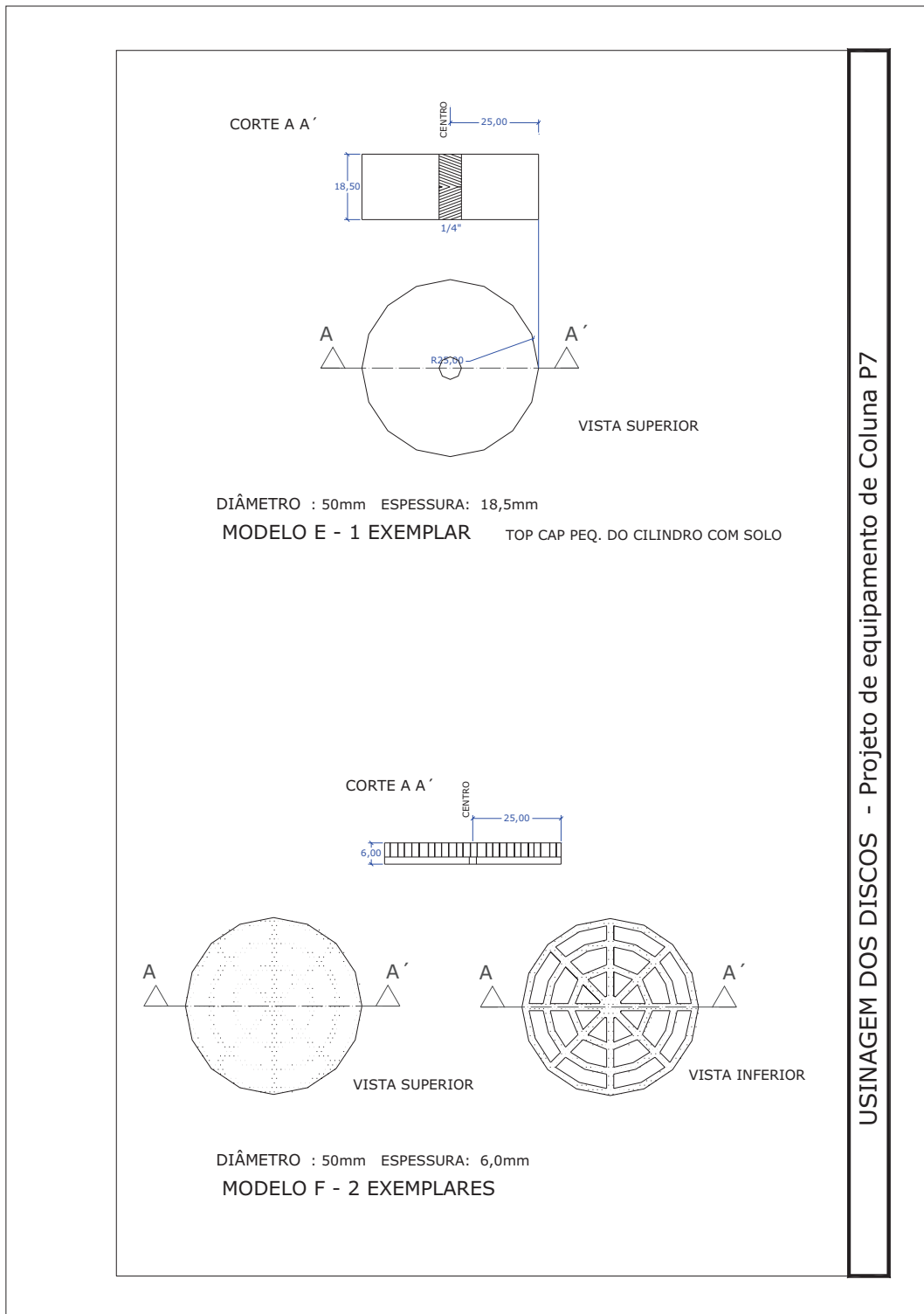


Figura 4.8 –Projeto do disco poroso e do *top cap* pequeno do cilindro com solo do equipamento de coluna.

O equipamento de coluna foi desenvolvido no Laboratório de Geotecnia da FEAR/UPF tendo a capacidade de ensaiar um corpo de prova por vez, o equipamento possui três cilindros. O cilindro A recebe o efluente e ar comprimido, o cilindro B recebe a amostra de solo indeformada, e o cilindro C recebe água e ar comprimido (Figura 4.9).

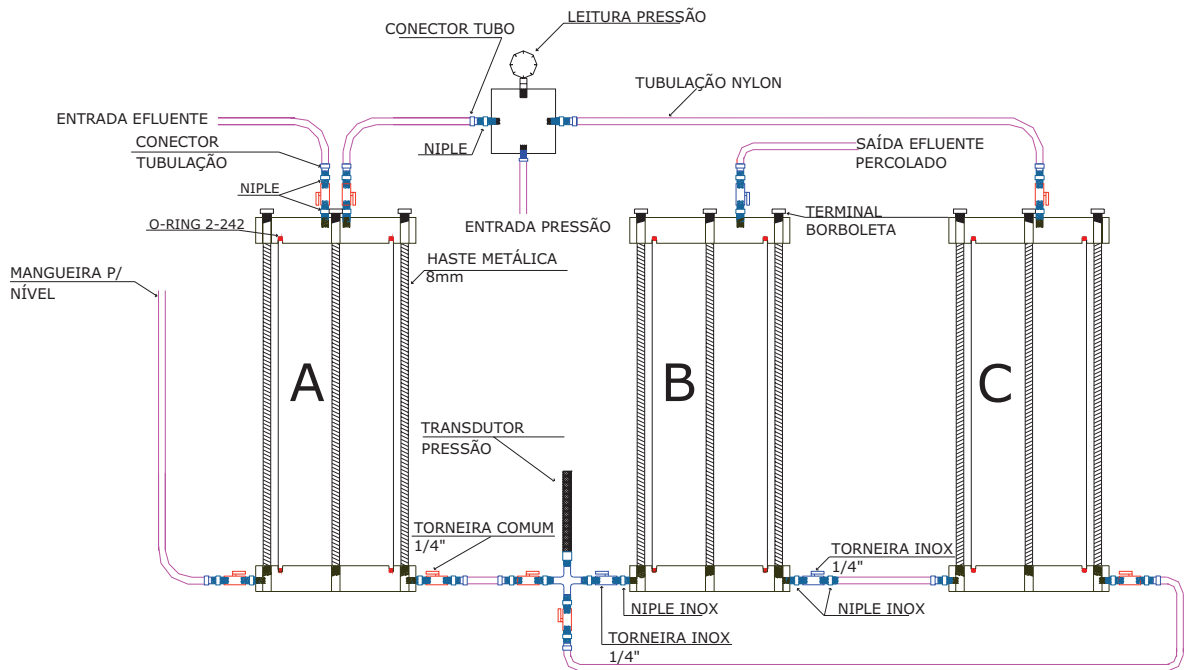


Figura 4.9 – Desenho esquemático representando o equipamento de coluna.

O processo de montagem deu-se logo após o término da usinagem das peças.(Figura 4.10). Para a vedação dos encaixes entre os cilindros e os *top* e *end caps*, utilizou-se *o-rings* (Figura 4.11). Foram adquiridas conexões como niples, luvas, cruzetas e conectores para as ligações. As válvulas adquiridas, bem como as conexões, também são de aço inox. Foram empregadas tubulações de nylon, devido à alta capacidade de pressurização, bem como pela compatibilidade química para os contaminantes que poderão ser utilizados. Foi instalado um sistema de ar comprimido para pressurizar o efluente, que percola pela amostra e a água que pressiona a amostra, evitando fluxo preferencial entre o corpo de prova e a membrana. O compressor possui uma capacidade de pressurização de 400 kPa.

Para o monitoramento da pressão de ar, foi instalado um regulador manual de pressão e um transdutor de pressão com capacidade de 1000 kPa, a fim de controlar com exatidão a pressão com que o efluente entra em contato com a amostra de solo.

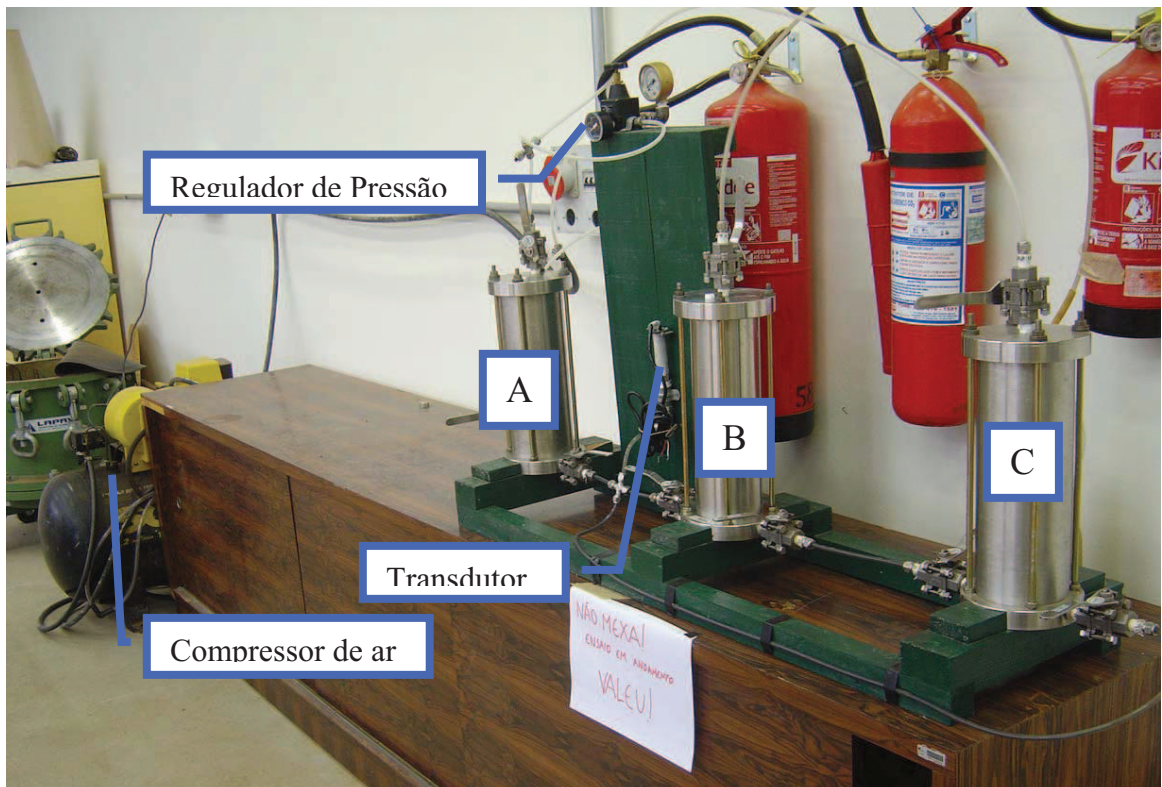


Figura 4.10 – Detalhe geral do equipamento de coluna.

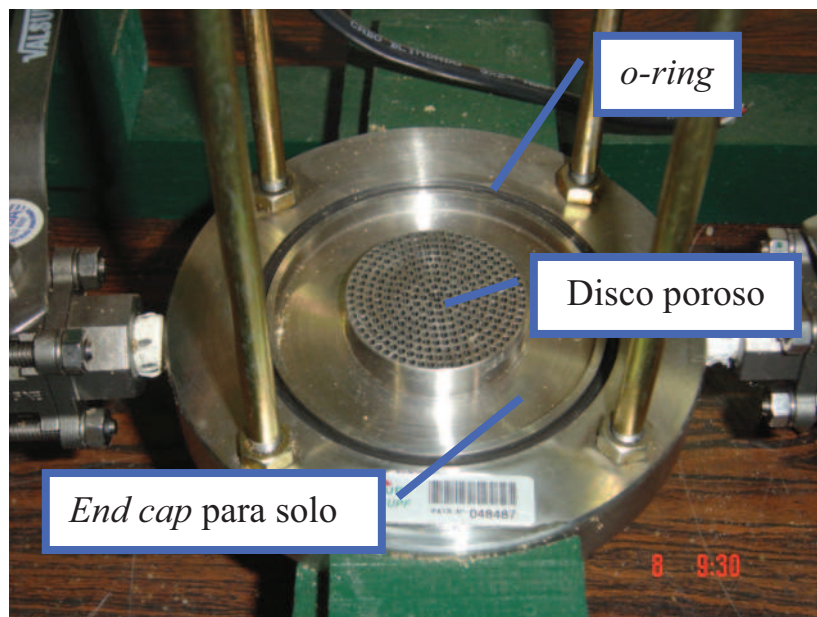


Figura 4.11 – *End cap* com disco poroso e *o-ring* do cilindro com solo.

O cilindro A possui uma entrada para o efluente, uma entrada para o ar comprimido (Figura 4.12) e uma saída de efluente. O cilindro B possui uma entrada e uma saída para o efluente, além de uma entrada para água. Este cilindro condiciona a amostra de solo

envolvida em uma membrana de látex presa por *o-rings* (Figura 4.13), pela qual ocorre a passagem de efluente, em fluxo ascendente através de um disco poroso, com pressões que simulam as condições de campo, onde a amostra de solo é confinada pela pressão da água. O cilindro C, possui uma entrada para a água e uma para o ar comprimido. Todas as entradas e saídas possuem válvulas para facilitar a execução do ensaio, e são interligadas com tubulação de nylon.



Figura 4.12 – Entrada de efluente e ar comprimido do Equipamento de Coluna.



Figura 4.13 – Cilindro do solo com corpo de prova revestido com membrana de látex.

4.2 Equipamento de colmatação

4.2.1 Projeto e Montagem

O equipamento de colmatação foi projetado visando simular as condições de campo, em que o solo encontra-se inundado pelo esgoto, sofrendo o processo de colmatação. Para tanto se montou no pátio externo do CETEC - Centro de Tecnologia da FEAR/UPF, um equipamento com capacidade de ensaiar oito corpos de prova, simultânea e individualmente, os quais encontram-se cobertos por água e esgoto.

O equipamento é constituído por oito colunas, todas em PVC-DN 200, com 60 cm de altura, sendo divididas em dois grupos que recebem, separadamente, água e esgoto. Cada grupo possui duas amostras da área de aterro e duas da área de corte, estas amostras estão interligadas com tubos de PVC DN 25 aos recipientes que acondicionam água e esgoto, líquidos que ficam em contato com a amostra continuamente. O equipamento possui uma

altura constante de coluna d'água de 2,5m, que condiz com a altura de esgoto projetada na lagoa anaeróbia.

As figuras 4.14 e 4.15, apresentam as características de projeto do equipamento de colmatação.

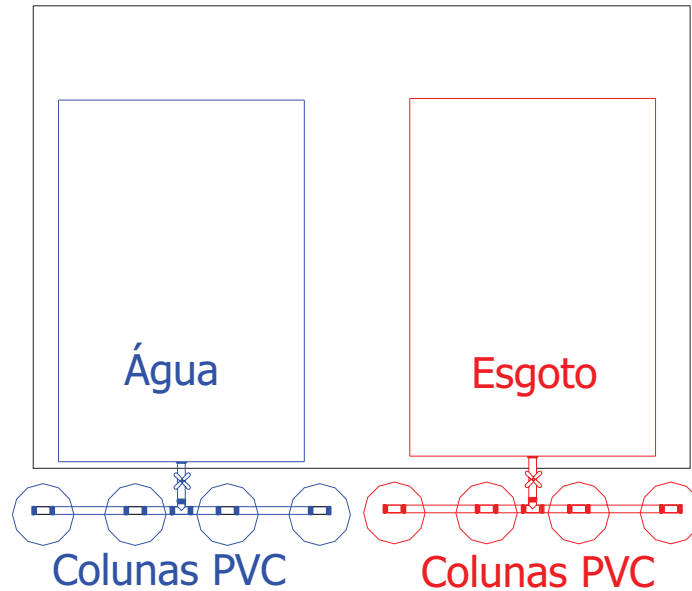


Figura 4.14 – Montagem do Equipamento de Colmatação, em planta.

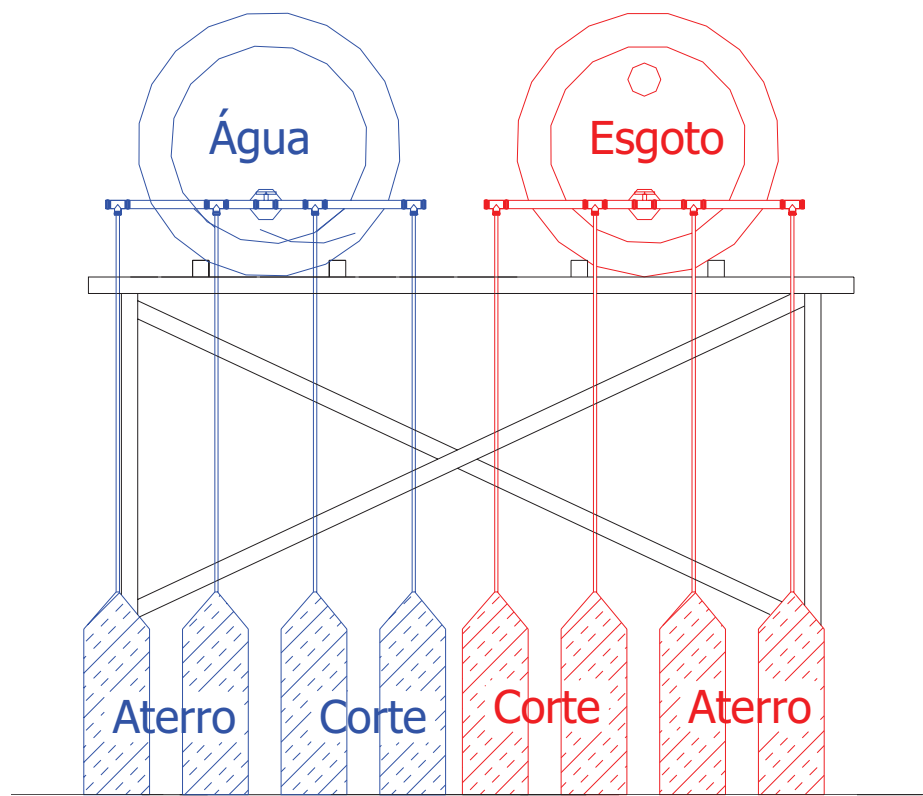


Figura 4.15 – Montagem do Equipamento de Colmatação, perfil.

As amostras de solo da área de corte e de aterro foram acondicionadas nos tubos, os quais receberam uma camada de brita e areia formando um filtro no fundo, no espaço vazio entre o tubo e a amostra foi adicionado lama bentonita no traço 1:9, (1 de lama bentonita : 9 de água) (Figuras 4.16 e 4.17).



Figura 4.16 – Amostra de solo da área de corte com lama bentonita.

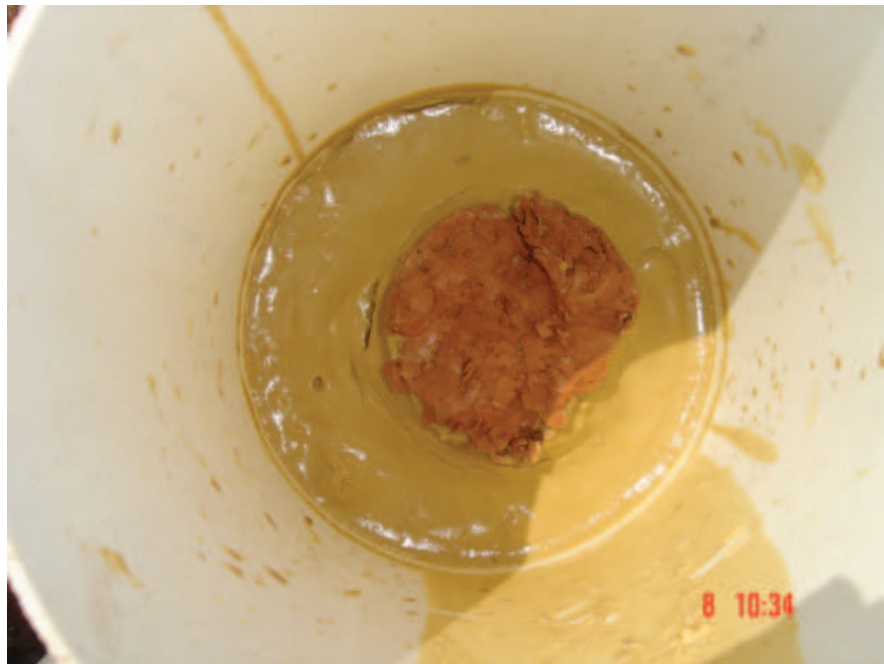


Figura 4.17 – Amostra de solo da área de aterro com lama bentonita.

O equipamento é abastecido com esgoto (Figura 4.18) e água, para poder comparar os tratamentos.



Figura 4.18 – Abastecimento do equipamento de colmatação com efluente.

Na Figura 4.19, observa-se o equipamento em funcionamento, com seus recipientes azul e preto, cheios de esgoto e água, respectivamente, onde cada recipiente abastece duas amostras da área de aterro e duas amostras da área de corte. O efluente percolado pelas amostras segue até uma fossa existente no local.

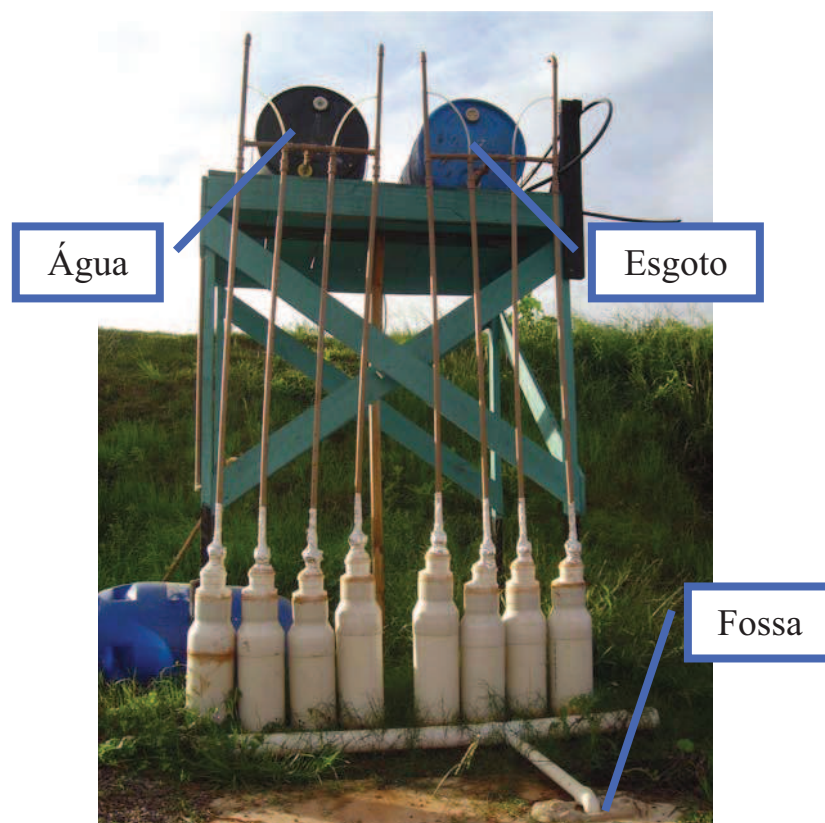


Figura 4.19 – Equipamento de colmatação.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Caracterização do solo

O solo foi caracterizado nos laboratórios de Geotecnia da Faculdade de Engenharia e Arquitetura e Laboratório de Solos da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, ambos da UPF. A caracterização do solo é apresentada a seguir nas Tabelas 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5 e nas Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4.

Tabela 5.1 - Características Físicas do solo da ETE Araucárias – Área de Corte.

Param./Solo	Corte 1	Corte 2	Corte 3
Densidade Real dos Grãos (KN/m ³)	2,56	2,49	2,65
Argila (%)	25,07	18,80	28,08
Silte (%)	6,29	35,20	8,93
Areia Fina (%)	66,75	44,10	62,79
Areia Média (%)	1,89	1,90	0,19
Limite de Liquidez (LL)	31,45	NP	23,80
Limite de Plasticidade (LP)	23,03	NP	19,40
Índice de Plasticidade (IP)	8,42	NP	4,40

NP – Não plástico

Observa-se na Tabela 5.1, que na área de corte há uma predominância de areia fina e a amostra corte 3 é um solo não plástico.

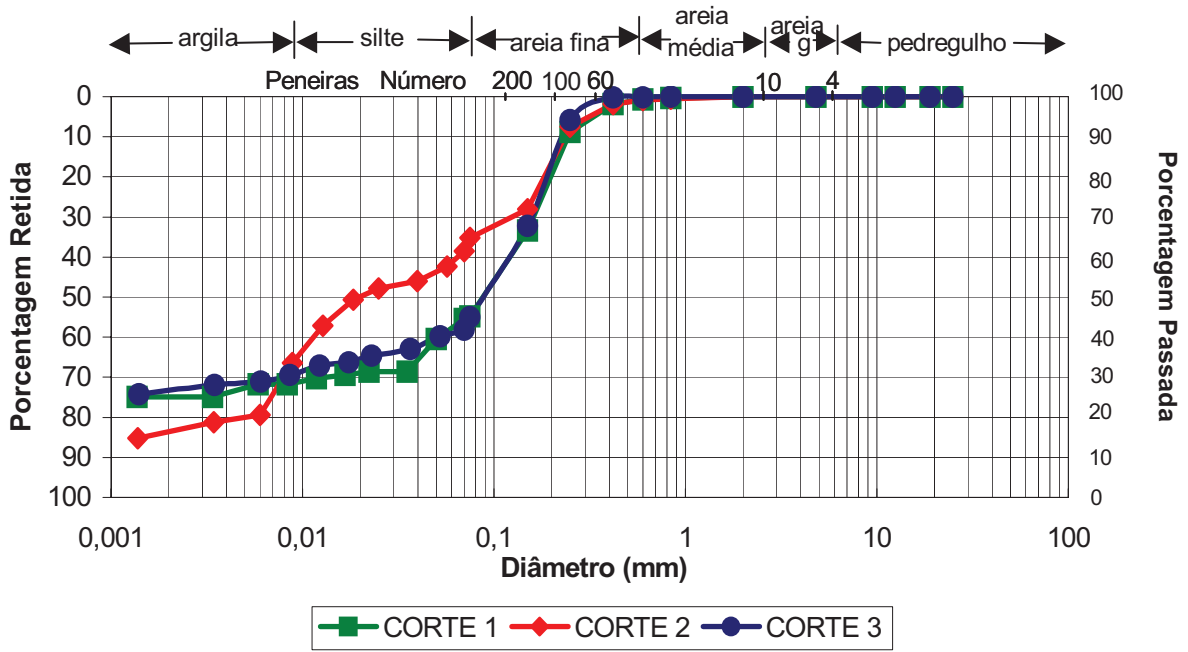


Figura 5.1 – Curvas Granulométricas da área de corte.

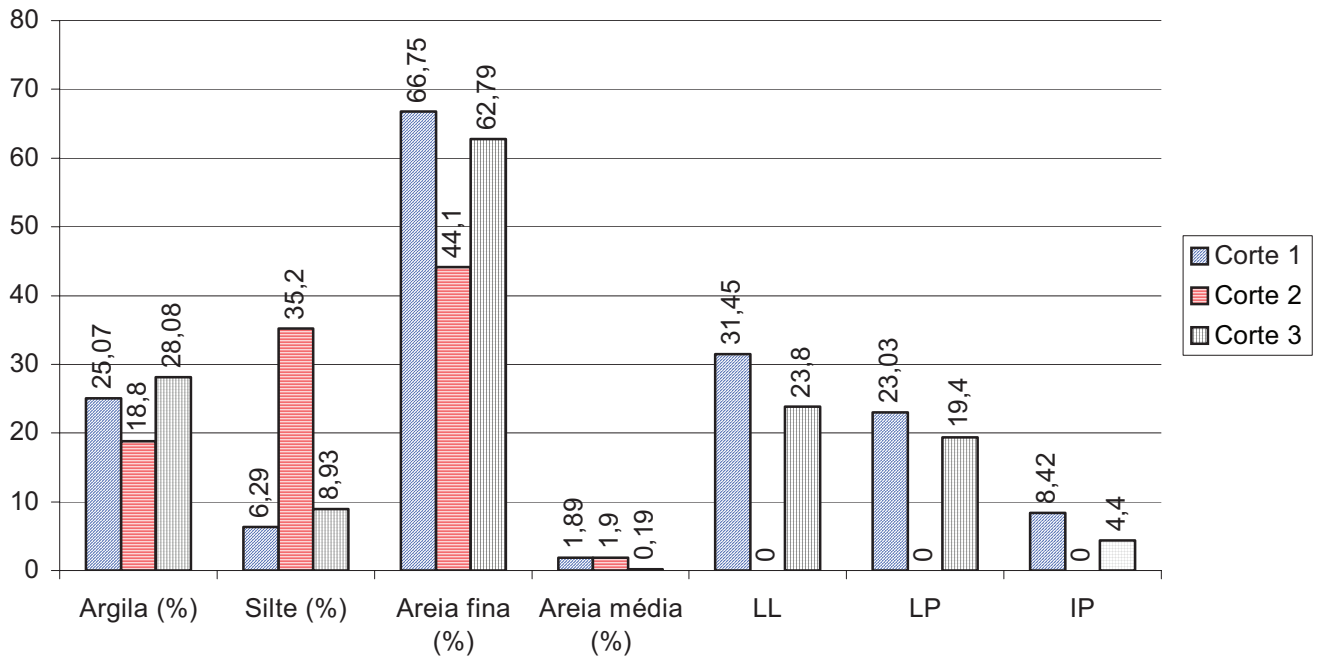


Figura 5.2 – Características físicas dos solos da área de corte.

Os solos da área de corte da lagoa anaeróbia foram classificados e os resultados estão apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Classificação dos solos da área de corte.

Classificação	Corte 1	Corte 2	Corte 3
Classificação “HRB”	A-4	A-4	A-4
Classificação “SUCS”	SM-SC	SM-SC	ML

Pode-se verificar na Tabela 5.2 que pelo método HRB, todas as amostras da área de corte foram classificadas como um solo fino (A4) e pelo método SUCS duas das amostras foram classificadas como areia siltosa/argilosa, e a amostra corte 3 como silte de baixa compressibilidade.

Tabela 5.3 - Características Físicas do solo da ETE Araucárias – Área de Aterro.

Param./Solo	Aterro 1	Aterro 2	Aterro 3
Densidade Real dos Grãos (KN/m ³)	2,45	2,69	2,70
Argila (%)	40,92	40,73	53,50
Silte (%)	6,34	8,21	1,70
Areia Fina (%)	51,37	51,04	44,80
Areia Média (%)	1,37	0,02	0,10
Limite de Liquidez (LL)	37,70	33,70	36,10
Limite de Plasticidade (LP)	30,31	26,71	21,60
Índice de Plasticidade (IP)	7,39	6,99	14,50

Observa-se na Tabela 5.3, que na área de aterro predomina-se argila e areia fina e o índice de plasticidade é maior na amostra aterro 3.

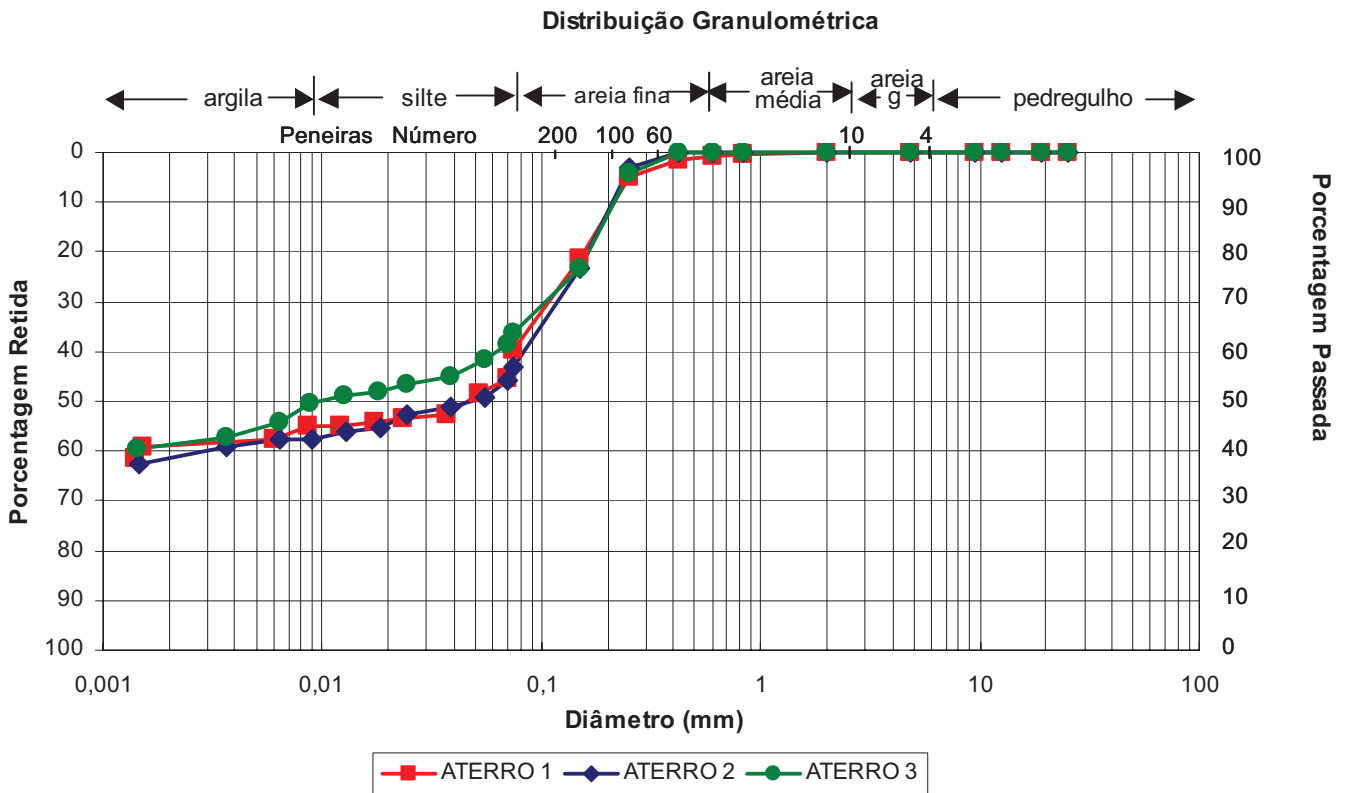


Figura 5.3 – Curvas Granulométricas da área de aterro.

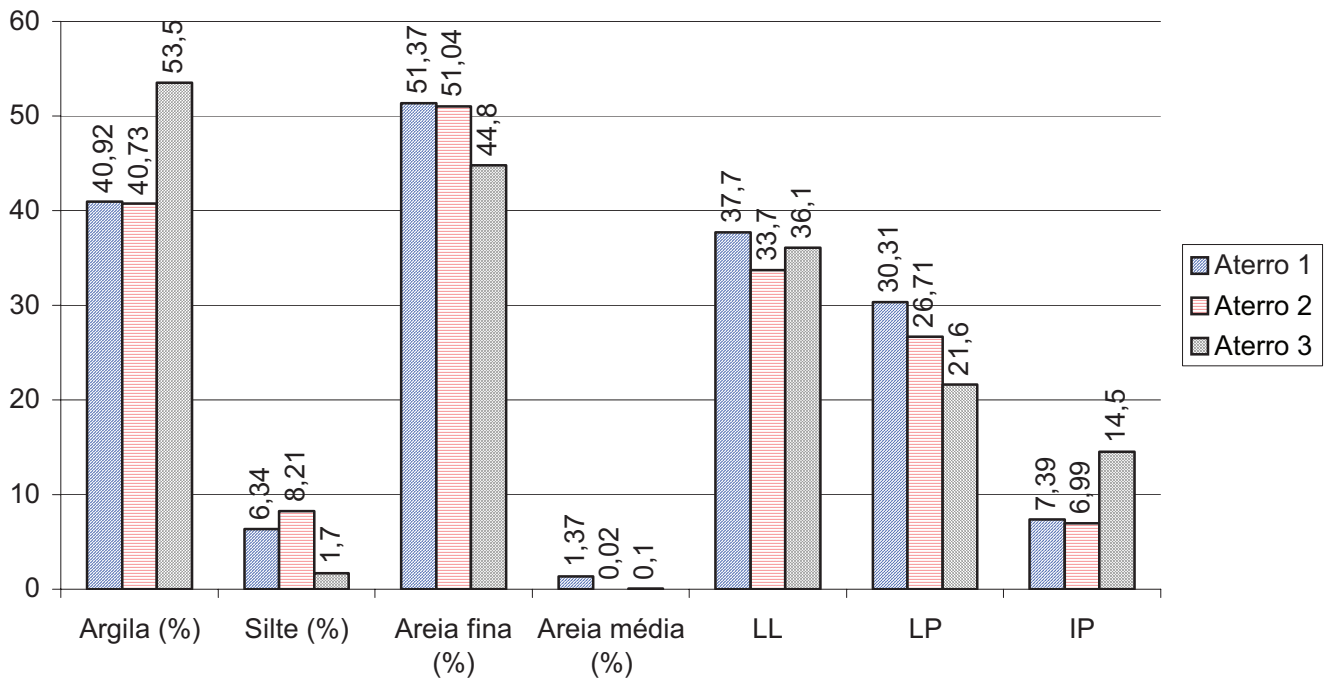


Figura 5.4 – Classificação dos solos da área de aterro.

Os solos da área de aterro da lagoa anaeróbia foram classificados e os resultados estão apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Classificação dos solos da área de aterro.

Classificação	Aterro 1	Aterro 2	Aterro 3
Classificação “HRB”	A-4	A-4	A-6
Classificação “SUCS”	ML	ML	CL

Pode-se verificar na Tabela 5.4 que, pelo método HRB, todos os pontos coletados foram classificados como um solo fino (A4-A6) e pelo método SUCS duas amostras apresentaram-se como um silte de baixa compressibilidade e a amostra aterro 3 como uma argila de baixa compressibilidade.

A análise básica e micronutrientes não foi realizada na primeira coleta de solo, portanto na Tabela 5.5 apresenta-se os resultados da coleta 2 e 3, das áreas de corte e aterro.

Tabela 5.5 - Resultados de análise básica e micronutrientes do solo da ETE Araucárias

Param./Solo	Corte 2	Corte 3	Aterro 2	Aterro 3
Argila (%)	34	28	49	37
pH H ₂ O	5,20	4,60	4,90	4,5
Ind. SMP	5,60	4,90	5,50	4,1
P (mg/dm ³)	2	19	2	2
K (mg/dm ³)	18	19	18	19
MO (%)	< 0,8	1,7	< 0,8	< 0,8
Al (cmol _c /dm ³)	3,0	3,7	2,9	8,7
Ca (cmol _c /dm ³)	0,3	0,5	0,4	0,4
Mg (cmol _c /dm ³)	0,2	0,2	0,4	0,2
H+Al (cmol _c /dm ³)	6,9	15,4	7,7	38,6
CTC (cmol _c /dm ³)	7,4	16,1	8,5	39,3
Saturação – Bases	07	05	09	02
Saturação – Al	85	84	79	93
Saturação – K	0,6	0,3	0,5	0,1
Enxofre (mg/dm ³)	32	1	43	10
Boro (mg/dm ³)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Manganês (mg/dm ³)	7	4	13	6
Zinco (mg/dm ³)	1,0	1,0	1,6	0,1
Cobre (mg/dm ³)	0,9	2,9	1,0	0,8
Condutividade Elétrica (mS/cm)	0,01	0,012	0,04	0,026

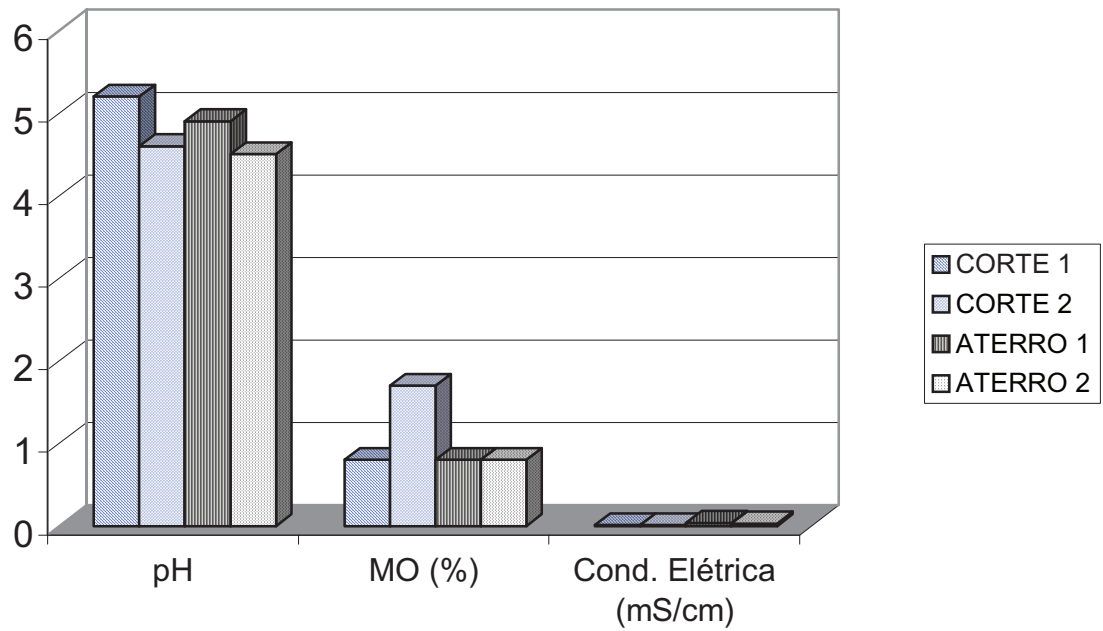


Figura 5.5 – Caracterização dos solos estudados através das análises básicas e condutividade elétrica.

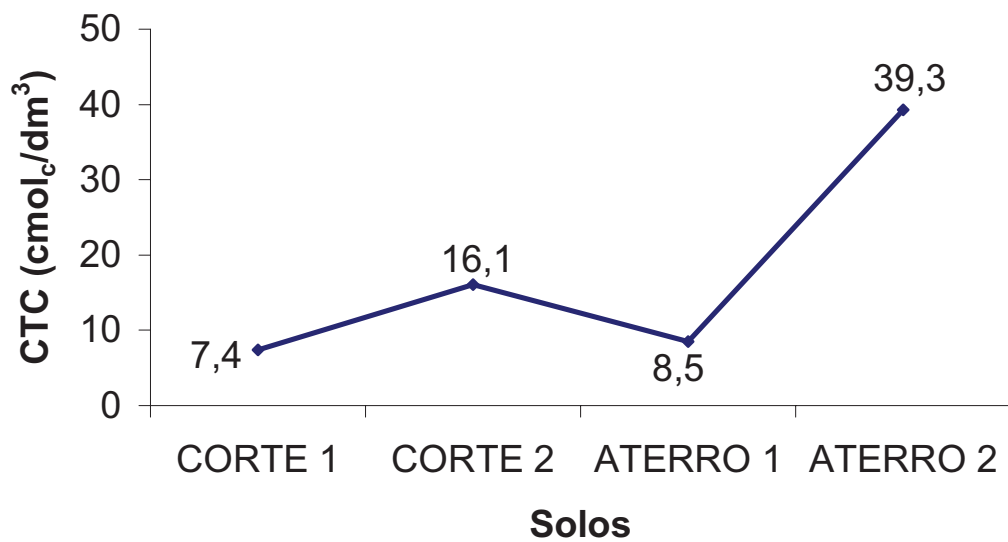


Figura 5.6 – CTC dos solos estudados.

Através da Tabela 5.5 e das Figuras 5.5 e 5.6, observa-se que os solos analisados da área de corte e da área de aterro apresentam uma baixa porcentagem de matéria orgânica, um pH ácido favorecendo a solubilização do alumínio, manganês e ferro, reduzindo a atividade das bactérias decompositoras da matéria orgânica, diminuindo a quantidade de nitrogênio, fósforo e enxofre, uma baixa condutividade elétrica, e em geral, uma baixa CTC que retém ânions como nitrato e cloretos.

5.2 Permeabilidade

5.2.1 Ensaio em cavas

A permeabilidade obtida pelo método do ensaio em cavas no solo da área de aterro foi de $8,21 \times 10^{-3}$ cm/s.

A Figura 5.7 apresenta o gráfico para o acompanhamento das vazões infiltradas, utilizado para decidir pelo término do ensaio em cavas.

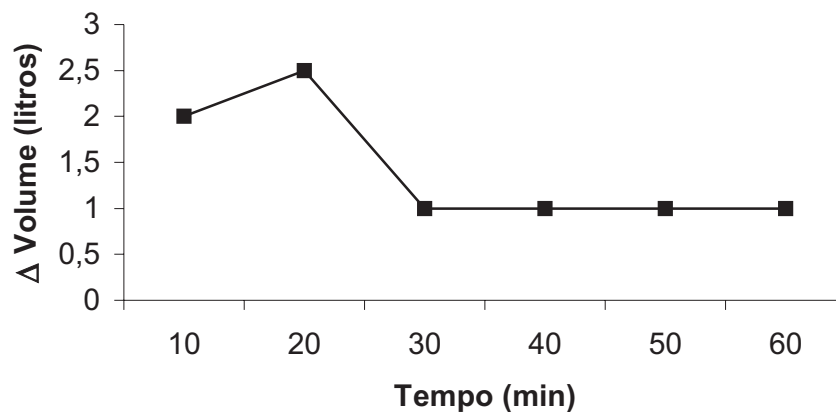


Figura 5.7- Gráfico da variação volume x tempo para decidir pelo término do ensaio em cavas.

5.2.2 Ensaio em sondagens – Piezômetro

A permeabilidade obtida pelo método do ensaio em piezômetro na área de aterro foi de $1,01 \times 10^{-5}$ cm/s.

A Figura 5.8 apresenta o gráfico para o acompanhamento das vazões infiltradas, utilizado para decidir pelo término do ensaio – piezômetro.

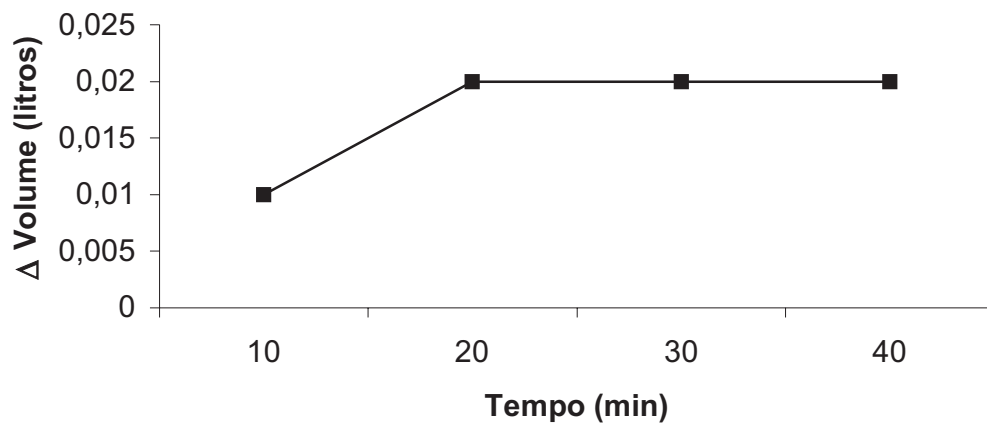


Figura 5.8- Gráfico variação volume x tempo para decidir pelo término do ensaio em piezômetro.

5.2.3 Ensaio no equipamento de coluna

Foram realizados três ensaios, sendo percolado esgoto, onde se verificou a permeabilidade de cada corpo de prova da área de corte e de aterro, porém da área de aterro apenas o segundo ensaio foi completo, os resultados estão apresentadas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Dados necessários para o cálculo de permeabilidade no equipamento de coluna.

Dados	Corte 1	Corte 2	Corte 3	Aterro 2
Diâmetro da amostra (cm)	5,07	5,06	4,99	5,01
Altura da amostra (cm)	10,07	10,11	10,07	10,13
Volume percolado (L)	1,41	1,37	0,95	0,73
Tempo (h)	22:55	19:10	16:40	45:10
Altura da coluna d'água (m)	2,50	2,50	2,50	2,50
Área (cm ²)	20,19	20,11	19,56	19,71
Gradiente hidráulico	24,83	24,73	24,83	24,68
Vazão (l/s)	1,71x10 ⁻⁵	1,98x10 ⁻⁵	1,58x10 ⁻⁵	4,49x10 ⁻⁶

A permeabilidade obtida foi de:

$$\text{Corte 1} - K = 3,41 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

$$\text{Corte 2} - K = 3,98 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

$$\text{Corte 3} - K = 3,25 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

$$\text{Aterro 2} - K = 0,9 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

5.2.4 Ensaios no equipamento de colmatção

Como as amostras possuem com as mesmas dimensões (altura e área superficial, apresentadas no item 3.4.1 e coluna d'água de 2,5m), tem-se um gradiente hidráulico de 8,33 e uma área superficial de $7,85 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.

A vazão foi obtida através da variação de volume percolado de esgoto x tempo, conforme Figura 5.9 e 5.10. Sendo utilizado a denominação (a) e (b) para os dias em que se realizou a leitura da vazão e a denominação (1) e (2) para representar os dois corpos de prova existentes de cada área estudada.

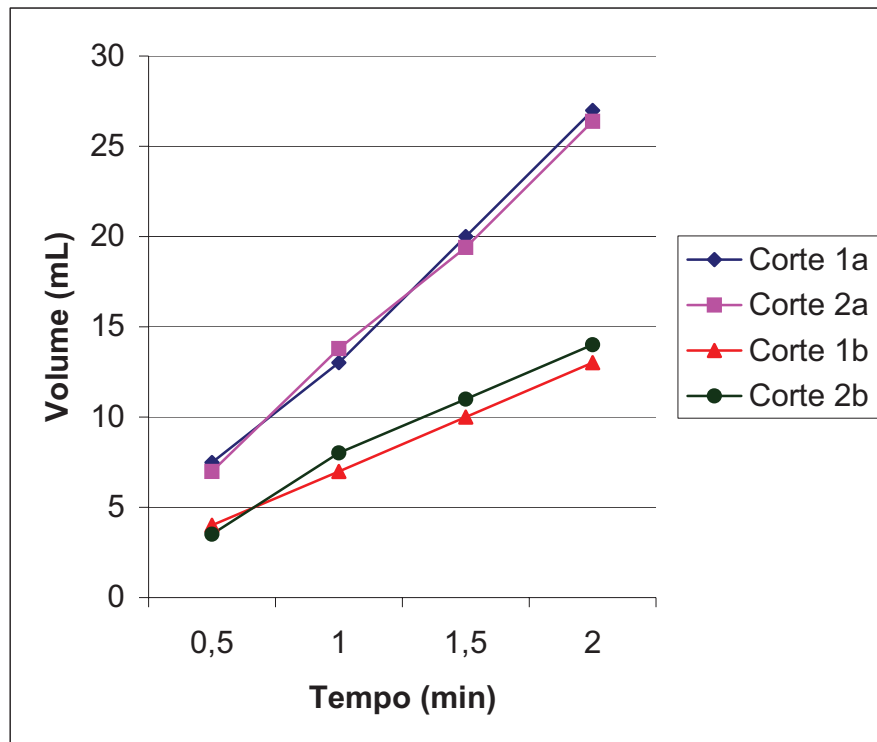


Figura 5.9- Gráfico tempo x volume da área de corte para obter a vazão do equipamento de colmatção.

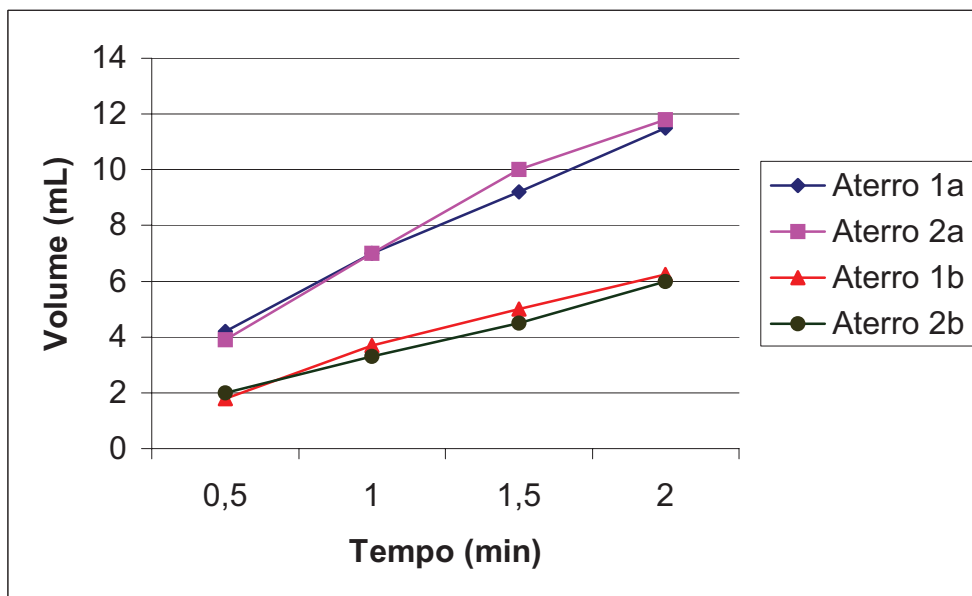


Figura 5.10- Gráfico tempo x volume da área de aterro para obter a vazão do equipamento de colmatção.

Foram feitas as médias das vazões dos corpos de prova, sendo agrupados por dia de leitura da vazão, sendo;

- Leitura do dia 13/01/05: Corte 1A e 2A, denominado corte A, Aterro 1A e 2A denominado aterro A.
- Leitura do dia 18/01/05: Corte 1B e 2B, denominado corte B; Aterro 1B e 2B denominado aterro B.

As vazões foram as seguintes:

$$\text{Corte A} - Q = 2,22 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Corte B} - Q = 1,12 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Aterro A} - Q = 9,7 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Aterro B} - Q = 5,1 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$$

A permeabilidade média obtida foi de:

$$\text{Corte A} - K = 3,41 \times 10^{-4} \text{ cm}/\text{s}$$

$$\text{Corte B} - K = 1,73 \times 10^{-4} \text{ cm}/\text{s}$$

$$\text{Aterro A} - K = 1,49 \times 10^{-4} \text{ cm}/\text{s}$$

$$\text{Aterro B} - K = 0,78 \times 10^{-4} \text{ cm}/\text{s}$$

Um resumo dos coeficientes de permeabilidade obtidos estão apresentados na Tabela 5.7, na qual pode-se observar uma variabilidade nos resultados, decorrentes da utilização de dois tipos de líquido para percolação (água e esgoto) e da heterogeneidade da compactação do solo, visto que o solo estava sob constante movimentação de máquinas durante a construção da ETE.

Tabela 5.7 – Coeficientes de permeabilidade obtidos

Método	Área de corte	Área de aterro
Ensaio em cavas	-	$8,21 \times 10^{-3}$ cm/s
Ensaio de infiltração - Piezômetros	-	$1,01 \times 10^{-5}$ cm/s
Equipamento de Coluna	$3,55 \times 10^{-5}$ cm/s	$0,92 \times 10^{-5}$ cm/s
Equipamento de Colmatação	$2,57 \times 10^{-4}$ cm/s	$1,13 \times 10^{-4}$ cm/s

Apesar de utilizar diferentes líquidos e diferentes métodos para obter o coeficiente de permeabilidade, existe uma discrepância no coeficiente obtido através do ensaio em cavas, que pode ser justificado, pois o método não é muito confiável porque, além da infiltração, considera a geometria da cava com dimensões exatas, porém a exatidão das medidas dificilmente acontece no campo.

5.3 Caracterização do Esgoto

O esgoto coletado na antiga estação de tratamento de esgotos localizado na Vila Annes, foi caracterizado no Laboratório de Controle de Efluentes – LACE e no Centro de Pesquisa em Alimentação – CEPA, ambos da UPF. Os parâmetros estão apresentados na tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Características do Esgoto de Passo Fundo

Param./Efluente	Mar/04	Jun/04	Out/04	Abril/05	Faixa	Pad. de lançamento
pH	7,19	7,74	8,47	7,7	6,7 – 7,5	6,0 – 8,6*
DQO (mg/LO ₂)	592	596	660,14	524	450 – 800	≤ 100*
DBO (mg/LO ₂)	314	282	78,54	3,93	250 – 450	≤ 3**
DQO/DBO	1,89	0,47	0,13	0,01	1,7 – 2,4	-
Alcalinidade (mg/L)	168	152	163	165	110 – 170	-
Cloretos (mg/L)	62	38	1,86	69,58	20 – 50	250**
Sólidos Totais (mg/L)	512	202	904	712	700 – 1350	-
Sólidos Suspensos (mg/L)	142	71	250	263	200 – 450	≤ 40*
Sólidos Sedimentáveis (mg/L)	0,2	< 0,1	<0,1	<0,1	10 – 20	≤ 1*
Nitrato (mg/L)	3,34	2,60	ND	ND	0 – 2	10**
Nitrogênio Total (mg/L)	38,7	30,4	38,0	35,3	35 – 70	10*
Fósforo Total (mg/L)	2,08	2,44	1,5	>6	5 – 25	0,1**
Coliformes Fecais NMP/100mL	-	2×10^2	$5,4 \times 10^6$	$1,6 \times 10^7$	$10^5 - 10^8$	≤ $2 \times 10^{2**}$

ND – Não detectado pelo método * Portaria 05/89 - SSMA **Resolução 357 - CONAMA

As Figuras 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14 apresentam as características do efluente sendo comparado com os padrões mínimos e máximos utilizados por VON SPERLING (1996).

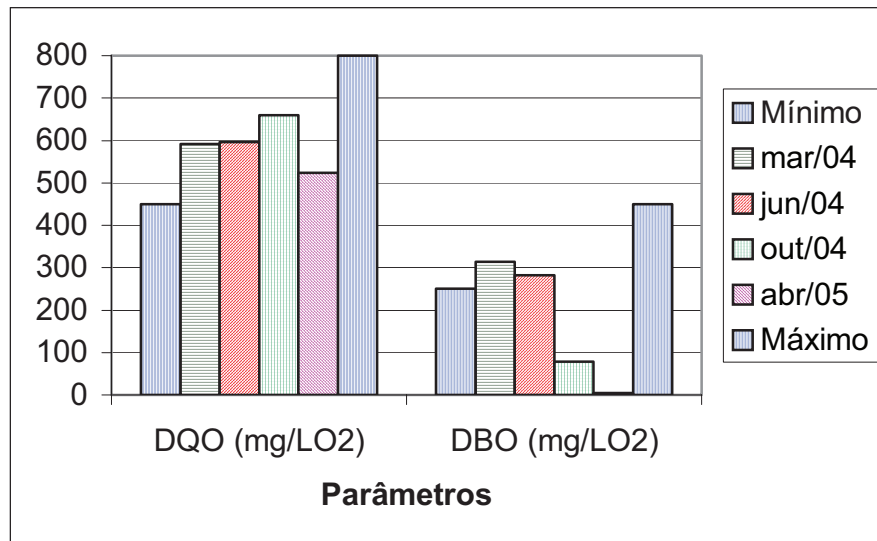


Figura 5.11 – Caracterização e comparação dos parâmetros DQO e DBO.

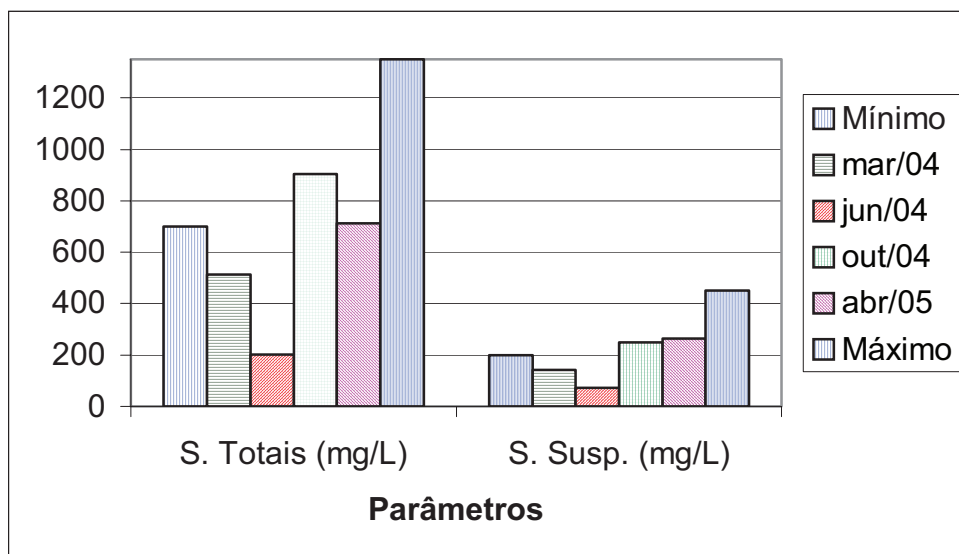


Figura 5.12– Caracterização e comparação dos parâmetros sólidos totais e suspensos do efluente.

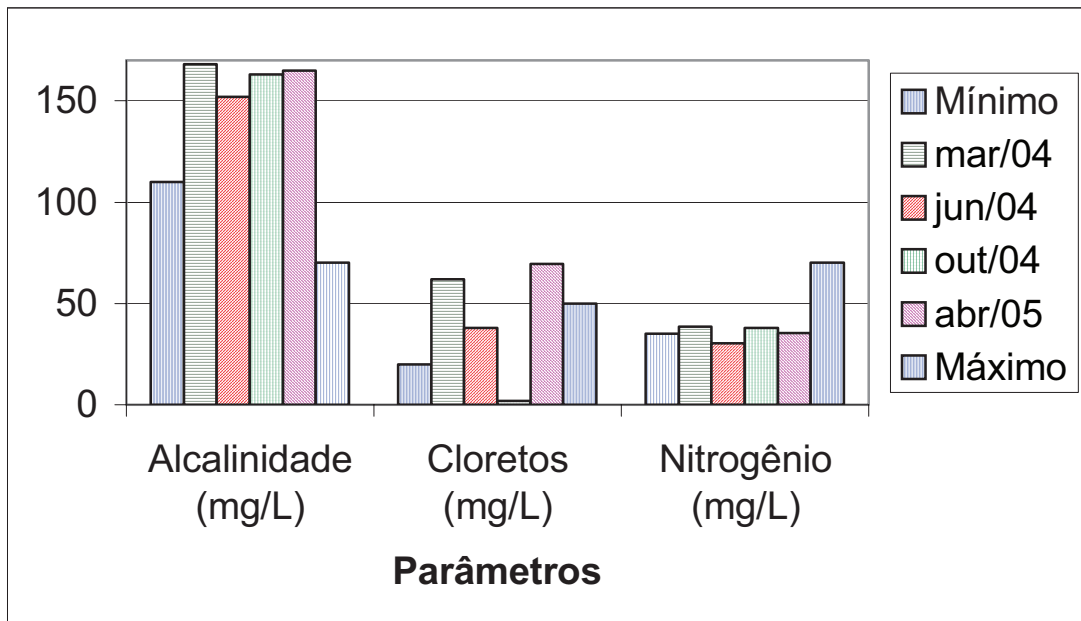


Figura 5.13– Caracterização e comparação dos parâmetros alcalinidade, cloretos, e nitrogênio do efluente.

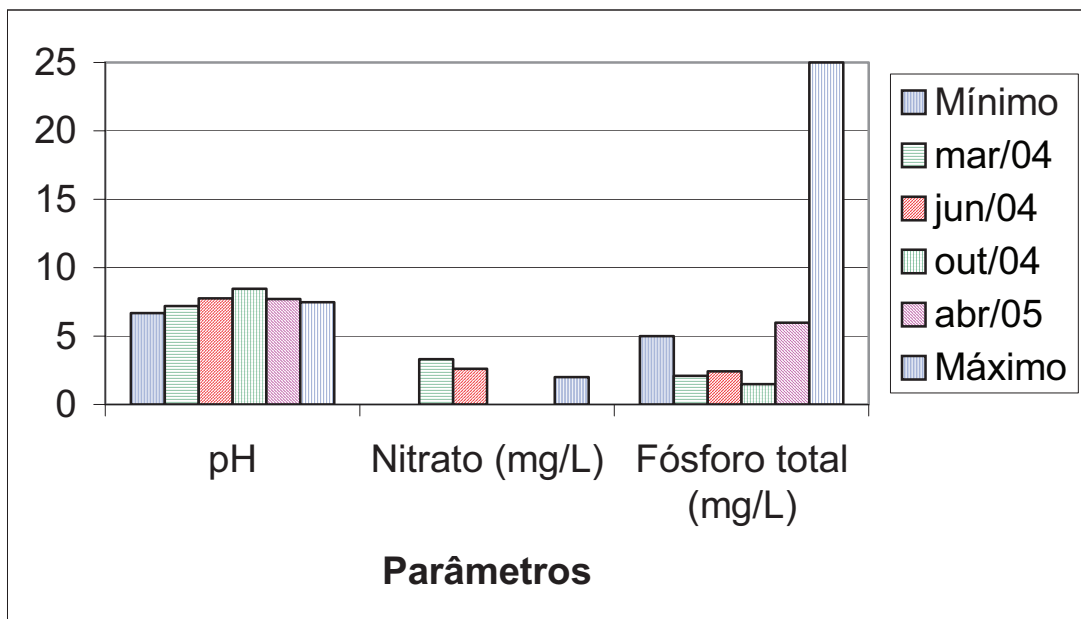


Figura 5.14– Caracterização e comparação dos parâmetros pH, nitrato e fósforo total do efluente.

Tabela 5.9 – Caracterização e comparação do parâmetro Coliforme Fecal do Esgoto de Passo Fundo

Coliformes Fecais	
Faixa (NMP/100mL)	10^5 - 10^8
Junho 2004 (NMP/100mL)	2×10^2
Outubro 2004 (NMP/100mL)	$5,4 \times 10^6$
Abril 2005 (NMP/100mL)	$1,6 \times 10^8$

Comparando os parâmetros obtidos do esgoto de Passo Fundo, nos meses apresentados Figuras 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, e nas Tabelas 5.8 e 5.9, com as faixas características apresentadas por VON SPERLING (1996), observa-se que o pH, o nitrato e o cloreto em alguns meses apresentaram-se acima do limite superior esperado para as características de esgoto. Os parâmetros de DQO e alcalinidade apresentaram-se dentro da faixa esperada. Os demais parâmetros DBO, DQO, Sólidos Suspensos, Nitrogênio Total, Fósforo Total e Coliformes quando não estão na faixa apresentada, encontram-se abaixo da faixa. Através destes apontamentos afirma-se que o esgoto de Passo Fundo, possui em alguns casos, afinidade com os valores apresentados como faixa típica de esgotos domésticos, porém existe uma diferença, que pode ser justificada, pois as características dos esgotos domésticos é função dos usos à qual a água foi submetida, sendo que os usos sofrem alteração conforme o clima, a situação social e econômica da população, e também pelos hábitos locais existentes.

Analisando o esgoto de Passo Fundo, através dos padrões de lançamento, observa-se que o pH, o nitrato e o cloreto, segundo as legislações, pode ser lançado nos corpos hídricos. Os parâmetros DBO, DQO, Sólidos Suspensos, Nitrogênio Total, Fósforo Total e Coliformes Fecais, nas concentrações apresentadas, determina que o esgoto não pode ser lançado sem tratamento nos corpos hídricos. Portanto, existindo qualquer parâmetro do esgoto acima do estabelecido pelas normas de padrões de lançamento de efluentes, impossibilita o lançamento deste em corpos d'água.

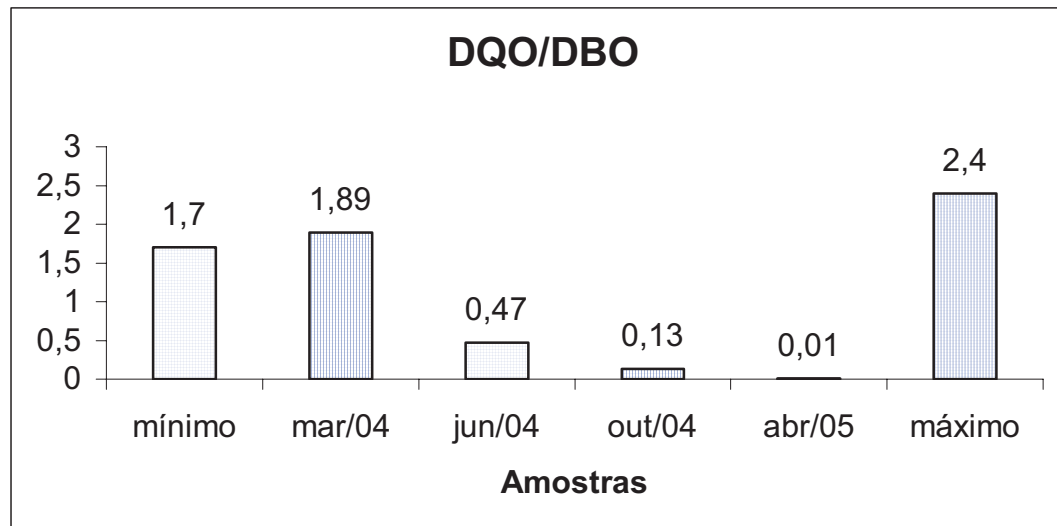


Figura 5.15– Relação DQO/DBO do efluente.

A partir da relação DQO/DBO, apresentada na Figura 5.15, observa-se que na maior parte do tempo, esta relação, apresenta-se abaixo dos valores esperado (denominados mínimo e máximo) para esgotos domésticos segundo VON SPERLING (1996), através disto, pode-se afirmar que o efluente possui uma alta biodegradabilidade, a fração inerte (não biodegradável) é baixa e provavelmente pode ser tratado biologicamente.

5.4 Medição da Vazão

O horário de maior vazão foi definido, após medição realizada na calha Parshal existente no local (Antiga ETE de Passo Fundo). nos meses de outubro e dezembro de 2004, conforme Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Horários e vazões utilizados para determinar o horário da coleta de efluente.

Horários	Outubro/04		Dezembro/04	
	Altura (cm)	Vazão (L/s)	Altura (cm)	Vazão (L/s)
8:00	37,50	119,29	37,50	119,29
10:00	40,00	131,67	30,00	84,79
12:00	40,00	131,67	45,00	157,67
14:00	45,00	157,67	40,00	131,67
16:00	35,00	107,34	37,50	119,29
18:00	35,00	107,34	35,00	107,34

Pode-se observar na Figura 5.16, que os horários de maior vazão obtidos neste trabalho são semelhantes aos apresentados por Imhoff (1996). A vazão máxima do esgoto de Passo Fundo foi definido como sendo de 157,67 L/s, que ocorre entre as 12:00 e 14:00 h.

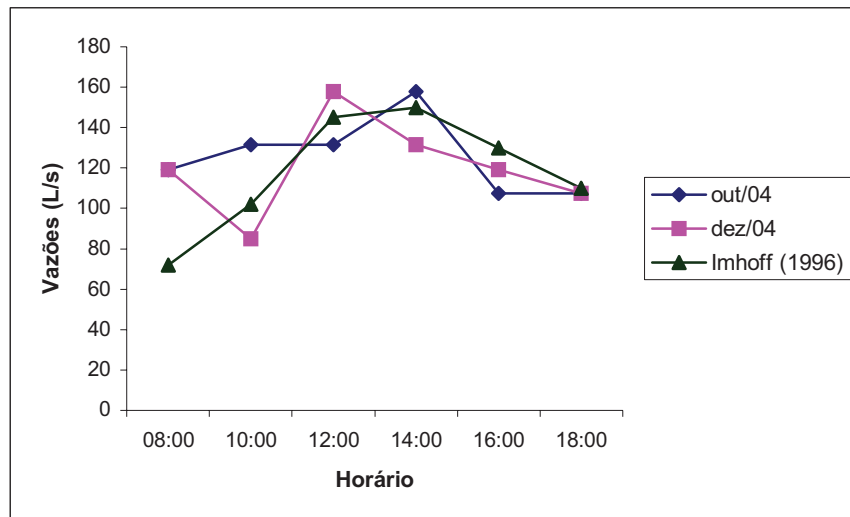


Figura 5.16– Vazões do efluente na antiga ETE medida ao longo do dia.

5.5 Ensaio de Coluna

Através do ensaio de coluna obteve-se:

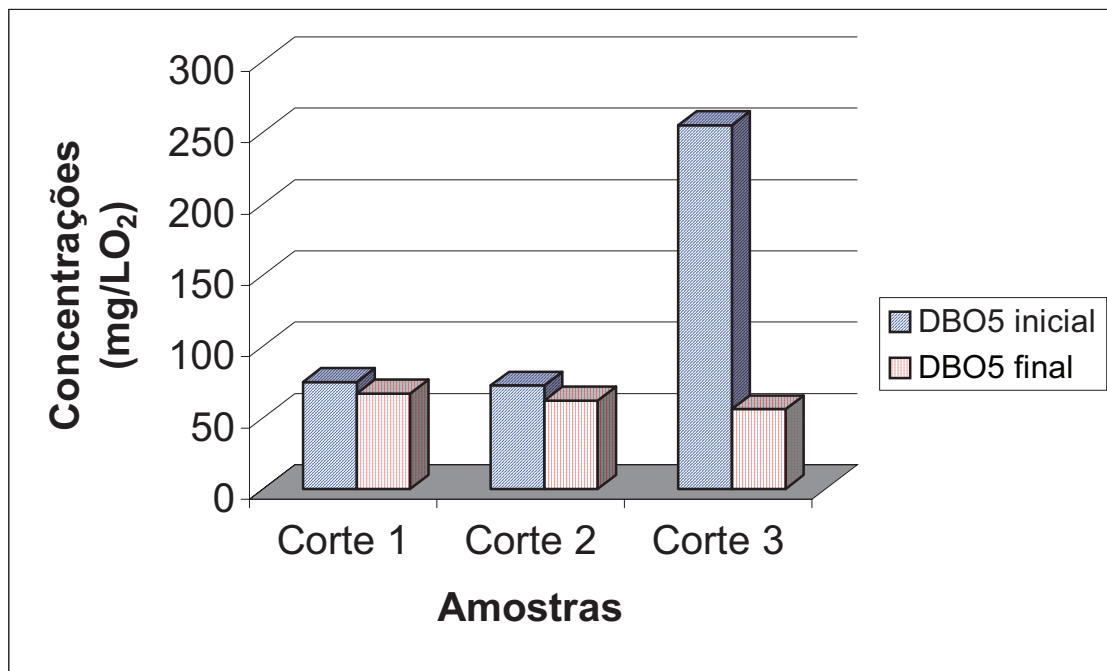
- Permeabilidade dos solos, apresentado no item 5.2.
- Capacidade de atenuação dos solos, apresentado a seguir:

A medida da atenuação dos solos foi obtida através das diferenças de concentrações dos efluentes, antes da percolação e após percolação, sendo analisados os parâmetros de DBO e DQO, conforme apresentado na Tabela 5.11 e nas Figuras 5.17, 5.18 e 5.19.

Tabela 5.11 – Capacidade de atenuação dos solos da área de corte e aterro.

Solo	DBO inicial (mg/LO ₂)	DBO final (mg/LO ₂)	Redução %	DQO inicial (mg/LO ₂)	DQO final (mg/LO ₂)	Redução %
Corte 1	75	67	10,66	727	342	52,95
Corte 2	72,5	62	14,48	427	232	45,67
Corte 3	255	56	75,11	324	116	64,20
Aterro 1	78,64	ND	-	660,14	ND	-
Aterro 2	9,83	334,22	-	427	56	86,88
Aterro 3	396,20	ND	-	320	ND	-

ND – Não definido

Figura 5.17– Capacidade de atenuação do solo da área de corte para DBO₅.

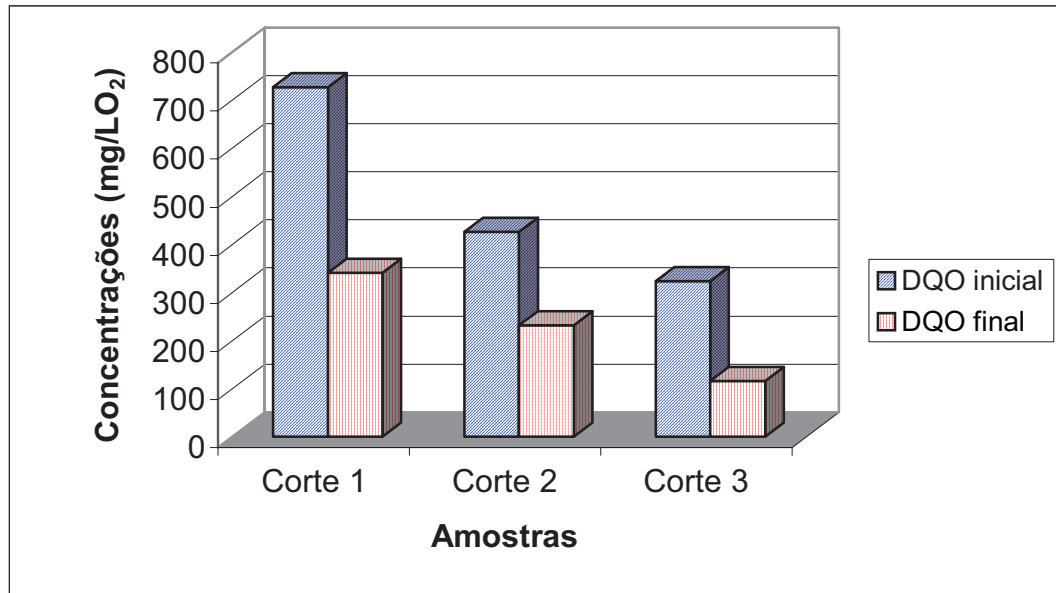


Figura 5.18– Capacidade de atenuação do solo da área de corte para DQO.

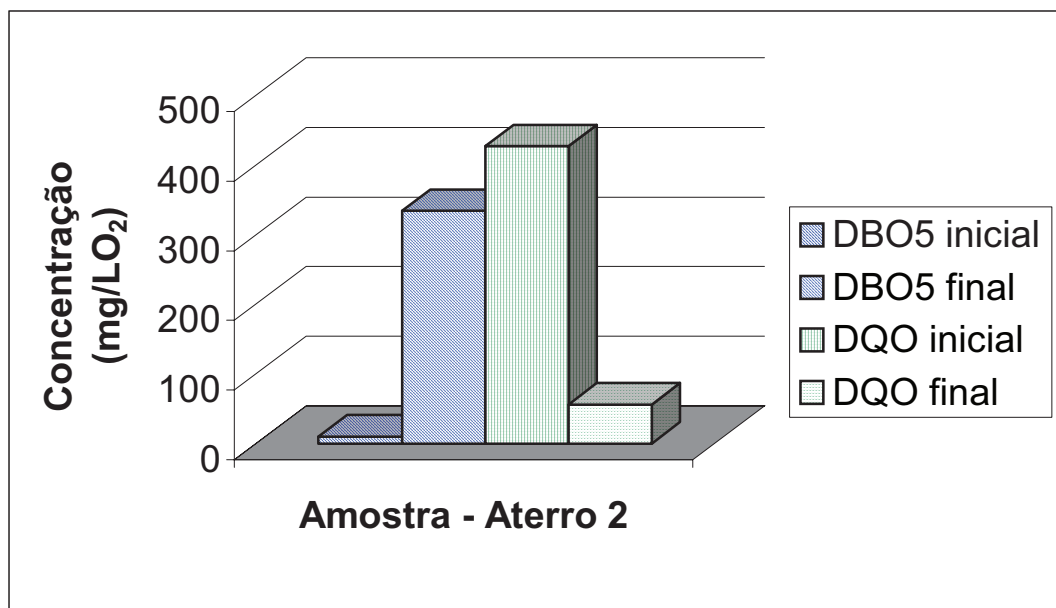


Figura 5.19 - Capacidade de atenuação do solo da área de aterro para DQO e DBO₅.

Tanto para os parâmetros de DBO₅ e DQO, nos solos da área de corte, observa-se uma redução nas concentrações com a percolação. Porém, a redução do parâmetro de DQO foi mais significativa do que a DBO₅, ou seja, ocorreu uma redução maior na fração não biodegradável do efluente.

Na área de aterro, apenas a amostra aterro 2 foi analisada, visto que nas demais amostras não houve percolação do efluente num período de 48 horas, portanto não foi possível realizar as análises.

Na amostra analisada, verifica-se um aumento significativo da DBO_5 e uma redução da DQO. O aumento da DBO pode ser consequência de um erro laboratorial, visto que o esperado seria uma redução, pois o efluente foi percolado por uma amostra de solo que possui baixa quantidade de matéria orgânica e, principalmente, porque os microorganismos para degradar a matéria orgânica presente no efluente, necessitam consumir oxigênio, diminuindo a DBO.

5.6 Ensaio de Colmatação

Através do ensaio de colmatação obteve-se a permeabilidade dos solos, apresentado no item 5.2. A verificação da colmatação pode ser observada através da redução da permeabilidade, porém foram feitas apenas duas leituras, porque o equipamento apresentou deficiência na parte hidráulica. O equipamento foi reprojeto, no entanto, não houve tempo suficiente para a realização de novas leituras.

A redução da permeabilidade está apresentada na Figura 5.20, onde se observa que na área de corte ocorre uma sutil redução, porém na área de aterro a redução foi de uma unidade logarítmica. Estas reduções não podem ser conclusivas com relação à colmatação. Para se obter dados conclusivos, deve-se realizar novas leituras durante um período de tempo mais significativo.

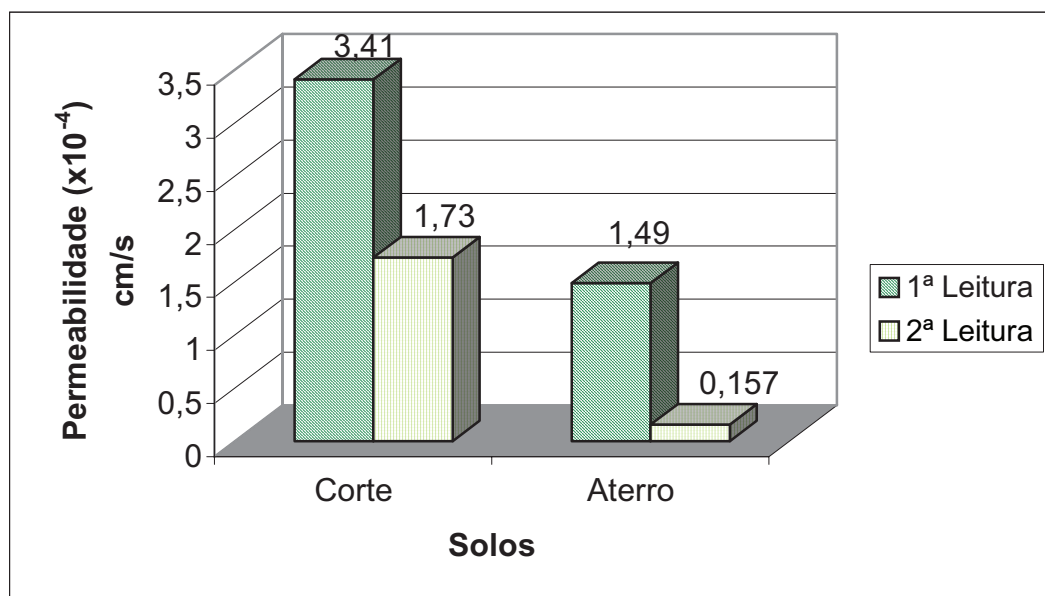


Figura 5.20 – Redução da permeabilidade no equipamento de colmatação.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 Conclusões da Pesquisa

As conclusões desta pesquisa são:

- O solo da área de corte foi caracterizado como:
 - um solo fino pelo método HRB;
 - uma areia siltosa/argilosa ou um silte de baixa compressibilidade pelo método SUCS;
 - um gleissolo melânico, segundo EMBRAPA (1999);
 - uma areia fina siltosa e argilosa ou siltes argilosos considerando os coeficientes de permeabilidade.
- O solo da área de aterro foi caracterizado como:
 - um solo fino pelo método HRB;
 - um silte ou argila de baixa compressibilidade pelo método SUCS;
 - um latossolo vermelho distrófico, segundo EMBRAPA (1999);
 - uma areia fina siltosa e argilosa ou siltes argilosos considerando os coeficientes de permeabilidade.
- O contaminante (esgoto) foi caracterizado como um efluente muito variável e altamente biodegradável.
- A montagem do equipamento de coluna permitiu simular as condições de campo, ou seja, o contato do esgoto com o solo, sendo possível analisar a capacidade de atenuação do solo local com relação aos parâmetros DBO₅ e DQO. Houve uma redução das demandas biológicas e químicas de oxigênio nos corpos de prova do solo da área de corte analisados.

- O equipamento de colmatação, provou inicialmente ser adequado ao fim proposto, porém necessita da realização de um número maior de ensaios para uma conclusão definitiva.
- Apesar do solo apresentar uma boa capacidade de atenuação, com relação a DQO, de uma forma geral pode-se dizer que esta é limitada. Portanto, a ETE Araucárias, deverá prever uma impermeabilização no solo de fundo, já que na área de corte o lençol freático aflora nos períodos de alta pluviosidade.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Propõem-se os seguintes estudos para a continuidade desta pesquisa:

- Analisar os metais e os parâmetros microbiológicos no efluente antes e após percolado pelo equipamento.
- Analisar os corpos de prova após percolação, considerando os metais, os parâmetros microbiológicos e matéria orgânica.
- Estudo do grau de colmatação, até que não haja infiltração nas amostras analisadas.
- Monitoramento das águas subterrâneas através de piezômetros, instalados no local.
- Estudo e delineamento de uma suposta pluma de contaminação.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. *Standart methods for the examination of water and wastewater*. 19.ed. Washington: American Public Health Association, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Method for Leaching Solid Material in a Column Apparatus: D 4874* – Philadelphia, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: *Solo – Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 7180: *Solo – Determinação do Limite de Plasticidade*. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 6459: *Solo – Determinação do Limite de Liquidez*. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 6508: *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da Massa Específica*. Rio de Janeiro, 1984.

BAIRD, C.. *Química Ambiental*. Trad. RECIO, M.A.L. e CARRERA, L.C.M.. 2º ed., Porto Alegre: Bookman, 2002.

BASTOS, R. K. X. (Coord.). *Utilização de esgotos tratados em fertirrigação, hidroponia e piscicultura*. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003.

BORGES, A. F. et al. Desenvolvimento de um Sistema de Permeômetros para Ensaio de Transporte de Contaminantes em Laboratório. *Solos e Rochas*. São Paulo, v. 20, nº 3, 191-207, dezembro 1997.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 357, de 2005, *Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes*. Brasília, DF, 2005.

BRAGA, B. et al. *Introdução a Engenharia Ambiental*. São Paulo: Prentice Hall, 2002.

BURBARELLI, R. C. et. al. *Avaliação Microbiológica da Água Subterrânea em Área Irrigada com Efluente de Lagoa de Estabilização Anaeróbia*. In: SIMPÓSIO DE QUALIDADE AMBIENTAL, 4, 2004, Porto Alegre. Resumo, Porto Alegre, 2004.

CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M.; NEVES, M.C.P.. (Coord.). *Microbiologia do Solo*. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992.

CASSAN. *Lagoas de Estabilização*. Disponível em: < http://www.casan.com.br/saude_ete_lagoa.htm > Acesso em: 25 novembro 2003.

CETESB. *Águas Subterrâneas e Poços Tubulares*. São Paulo, CETESB, 1974.

CETESB. *Relatório de qualidade das águas subterrâneas no Estado de São Paulo 1998-2000*. São Paulo, CETESB, 2001.

CHARBENEAU, R. J. et al.. *Water Quality management Library Groundwater Remediation*. Vol 8. Lancaster: Technomic, 1992

COELHO, H.M.G. et al.. *Estudo preliminar da contaminação por metais pesados na área do aterro de disposição de resíduos sólidos urbanos do município de Catas Altas – MG.* In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 5º, 2003: REGEO. ABMS. Porto Alegre, 2003.

CORREA, A.C.S.S. et al.. *Parâmetros de solos tropicais para definição de modelo de atenuação de contaminantes*. In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 5º, 2003: REGEO. ABMS. Porto Alegre, 2003.

COSTA, L.N.C., OLIVEIRA, R.C.C.. *Legislação das Águas Subterrâneas: Uma breve contribuição*. Disponível em: <http://www.abas.org/publicacoes/anais/congressos/anais/IV_cong_br_agua_subt/index.htm> Acesso em: 15 junho de 2003.

COSTA, M.A.G.; COSTA, E.C.. *Poluição Ambiental: Herança para gerações futuras*. Santa Maria: Orium, 2004.

DACACH, N. G.. *Saneamento Básico*. 3ª ed. rev. Rio de Janeiro: EDC-Ed. Didática e Científica, 1990.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999.

FARIA, C. M.; LERSCH, E. C.; MORANDI, I. C.. *Influência do Lançamento do Efluente de Lagoas de Estabilização na Qualidade das Águas do Arroio de Salso*. Pesquisa Ecos. DMAE. Porto Alegre, 2000.

GONÇALVES, R. F. (Coord.). *Desinfecção de Efluentes Sanitários*. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003.

HEAD, K.H.. *Manual of soil laboratory testing*. Vol.1: Soil classification and compaction tests. London: Plymouth, 1980.

IMHOFF, KARL e KLAUS. *Manual de Tratamento de Águas Residuárias*. Trad. de M.L. Hess. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1996.

KNOP, A. *Encapsulamento de solos contaminados por hidrocarbonetos*. 2003. Dissertação. Mestrado em Engenharia – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

LUE-HING, C. et al.. *Water Quality management Library Municipal sewage sludge management: Processing, utilization and disposal*. Vol 4. Lancaster: Technomic, 1992

MACEDO, J. A. B.. *Águas & Águas - Métodos Laboratoriais de Análises Físico-Químicas e Microbiológicas*. Juiz de Fora – MG: Macedo, 2000.

MACHADO, S.L.. et al.. *Contaminação por metais pesados em Santo Amaro da Purificação – BA – Ensaio de coluna e parâmetros hidráulicos de um solo residual expansivo*. In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 5º, 2003: REGEO. ABMS. Porto Alegre, 2003.

MARA, D.D.. *Design Manual for Waste Stabilization Ponds in Índia Lagoon Technology International (1997)*. Disponível em: <<http://www.leeds.ac.uk/civil/ceri/water/tphe/publicat/pdm/india/india.html>>. Acesso em: 11 de junho de 2004.

MELLO, V., TEIXEIRA, A.M.. *Mecânica dos solos*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 1967. (Publicação nº 137).

MEYBECK, M.; HELMER R.. *An Introduction to Water Quality*. Disponível em: <http://www.who.int/docstore/water_sanitation_health/wqassess/ch06.htm>. Acesso em: 12 de julho de 2004.

MOTA, S.. *Preservação e Conservação de Recursos Hídricos*. 2ª ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995.

MOTA, S.. *Introdução à Engenharia Ambiental*. 1ª ed. Rio de Janeiro: ABES, 1997.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O.. *Microbiologia e Bioquímica do Solo*.Lavras: UFLA, 2002.

NUVOLARI, A. (Coord.). et al. *Esgoto Sanitário – Coleta, Transporte, Tratamento e Reúso Agrícola*. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

OLIVEIRA, A.M.S.; CORREIA FILHO, D.. *Ensaio de Permeabilidade em Solos*. São Paulo. 3ª edição, ABGE, 1996.

OLIVEIRA, J. B.. et al. *Classes gerais de solos do Brasil*. 2º ed. Jaboticabal, FUNEP, 1992.

PACHECO, A. et al. *A contaminação das águas subterrâneas pelos sistemas de disposição in situ – estudo preliminar*. Disponível em: <http://www.abas.org/publicacoes/anais/congressos/anais/IV_cong_br_agua_subt/index.htm> Acesso em: 15 junho de 2003.

PARAGUASSÚ, A. B. et al. Estudos Laboratoriais de Solos Lateríticos Visando Aplicação em Liners. *Geotecnica*. Lisboa - Portugal, nº 94, 37-55, março 2002.

PELCZAR Jr. M. J. et al. *Microbiologia: conceitos e aplicações*. 2ª ed. São Paulo: MAKRON Books, 1996.

PINHEIRO, J. M. *Relações entre água doce, esgoto, população, doença e meio ambiente (tratamento de esgoto)*. Disponível em: <<http://www.geocites.com/heartland/village/4281/esgoto.htm>> Acesso em: 25 novembro 2003.

PINTO, C. S.. Propriedades do Solo. In: HACHICH, Waldemar; et al. (Ed.). *Fundações Teoria e Prática*. 2ª ed. São Paulo:Pini, 1998. p. 51-118.

REDDI, L. N.; INYANG, H. I.. *Geoenvironmental Engineering:Principles and applications*. New York: Marcel Dekker. 2000.

RIO GRANDE DO SUL. *Código Estadual do Meio Ambiente*. Porto Alegre, 2000.

RIO GRANDE DO SUL. Portaria nº 05/89 – Secretaria da Saúde e Meio Ambiente - SSMA. *Dispõe sobre critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos no Estado do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, 1989.

SANEPAR. *O que é esgoto*. Disponível em: < <http://www.sanepar.com.br> > Acesso em: 02 agosto 2004.

SILVA, D. D.; PRUSKY F.F.. *Gestão de Recursos Hídricos: Aspectos legais, econômicos, administrativos e sociais*. Brasília, DF: Secretaria de Recursos Hídricos; Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa; Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2000.

SOUZA, S. B. S. et. al. *Monitoramento do Carbono Orgânico Total (TOC) no perfil do Solo Irrigado com Efluente de Lagoa Anaeróbia*. In: SIMPÓSIO DE QUALIDADE AMBIENTAL, 4, 2004, Porto Alegre. Resumo, Porto alegre, 2004.

SOUZA, S. B. S. et. al. *Quantificação de Coliformes Totais e E. Coli em Lixiviados de Solo Irrigado com Efluente de Lagoa Anaeróbia*. In: SIMPÓSIO DE QUALIDADE AMBIENTAL, 4, 2004, Porto Alegre. Resumo, Porto alegre, 2004.

STRECK, E.V. et al.. *Solos do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: EMATER/RS; UFRGS, 2002

SZUBERT, E. C.. *Riscos de contaminação das águas subterrâneas da região sul do estado do Rio Grande do Sul*. Disponível em: <http://www.abas.org/publicacoes/anais/congressos/anais/IV_cong_br_agua_subt/index.htm> Acesso em: 15 junho de 2003.

TAUK, S. M.. *Biodegradação de Resíduos Orgânicos no Solo*. Disponível em : <http://www.sbgeo.org.br/rgb/vol20_down/2001-2-3-4/2001299.pdf> Acesso em: 12 de julho de 2004.

TEDESCO, M.J.; et al.. *Análise de solo, plantas e outros materiais*. 2ª ed. Porto Alegre: UFRGS/Departamento de Solos, 1995. (Boletim Técnico, 5).

TORTORA, G.J.; FUNKE, B.R.; CASE, C.L.. *Microbiologia*. 6ª ed. Porto Alegre: Artes Médicas Sul, 2000.

TRATAMENTO DE ÁGUA. *Águas Subterrâneas: Um valioso Recurso que Requer Proteção*. Disponível em:<<http://www.tratamentodeagua.com.br/abace/prevencao/aquiferos.htm>>. Acesso em: 05 de dezembro de 2003.

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais. *Projeto Manuelzão*. Disponível em: <<http://www.manuelzao.ufmg.br/subprojetos/cartilha/glossario.htm>>. Acesso em: 03 de dezembro de 2003.

VEENSTRA, S.; ALAERTS, G.J.; BIJLSMA, M.. *Technology Selection*. Disponível em: <http://www.who.int/docstore/water_sanitation_health/wpcontrol/ch05.htm>. Acesso em: 12 de julho de 2004.

VON SPERLING, M.. *Lagoas de Estabilização*. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

VON SPERLING, M.. *Introdução à qualidade das águas e o tratamento de esgotos*. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

WHO - World Health Organization. *Approaches to Microbiological Monitoring*. Disponível em: <http://www.who.int/docstore/water_sanitation_health/bathwater/ch12.htm>. Acesso em: 12 de julho de 2004.