



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Vinícius Braga da Silveira Sousa


**AVALIAÇÃO DE ASPECTOS OPERACIONAIS DE ATERROS
SANITÁRIOS: ESTUDO DE CASOS**

Rio de Janeiro

2022

Vinícius Braga da Silveira Sousa

Avaliação de Aspectos Operacionais de Aterros Sanitários: estudo de casos



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Orientadora: Prof.^a Dra. Elisabeth Ritter

Rio de Janeiro

2022

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

S725 Sousa, Vinícius Braga da Silveira.
Avaliação de aspectos operacionais de aterros sanitários: estudo de casos / Vinícius Braga da Silveira Sousa. – 2022.
103f.

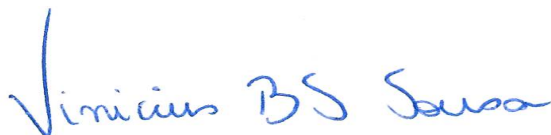
Orientadora: Elisabeth Ritter.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia ambiental - Teses. 2. Aterro sanitário - Lixiviação - Teses. 3. Gestão integrada de resíduos sólidos - Teses. 4. Lixo - Eliminação - Teses. I. Ritter, Elisabeth. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 628.4

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.



Assinatura

18/01/2023

Data

Vinícius Braga da Silveira Sousa

Avaliação de Aspectos Operacionais de Aterros Sanitários: Estudo De Casos

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial.

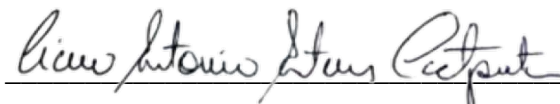
Aprovada em 15 de setembro de 2022.

Banca Examinadora:



Prof.^a Dr.^a. Elisabeth Ritter (Orientadora)

Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Dr. Cícero Antônio Antunes Catapreta

Superintendência de Limpeza Urbana - Prefeitura Municipal de Belo Horizonte



Prof. Dr. Alexandre Lioi Nascentes

Departamento de Engenharia - UFRRJ



Prof.^a Dr.^a. Camille Mannarino

Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca - FIOCRUZ

Rio de Janeiro

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Criador pelas oportunidades e por estar sempre comigo em cada momento da minha vida.

Agradeço aos meus pais, Delma e Waldecy, pois eles sempre fizeram o possível para me dar todo suporte e apoio necessário para chegar até aqui. Agradeço também ao meu irmão, Victor, por ser um grande exemplo e pelos belos presentes que são minhas sobrinhas Beatriz e Laura. Agradeço a minha namorada Luiza pelo apoio, paciência e pensamentos positivos de que daria tudo certo.

Agradeço a minha orientadora, Professora Elisabeth Ritter pela atenção, paciência e companhia nesta caminhada, assim como me mostrar que eu conseguiria e teríamos um bom resultado.

Agradeço aos meus professores do PEAMB que além de serem excepcionais em suas áreas, passaram de maneira magistral todo seu conhecimento e experiência. Em especial, um agradecimento ao Professor João Alberto, pelas conversas e sugestões para a realização deste trabalho.

Agradeço a Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) pela possibilidade e capacitação que me foi dada neste curso.

Agradeço às empresas envolvidas neste trabalho que mesmo sabendo da fragilidade do assunto, se dispuseram a participar com as informações e registros fotográficos.

Agradeço também aos meus colegas de trabalho que se dispuseram a me ajudar de alguma forma nesta jornada e dividiram um pouco do seu tempo comigo. Agradeço também a compreensão de meus gestores no apoio e compreensão para eu conseguir participar deste curso.

Agradeço ainda aos que irão ler este trabalho e conseguirão o aproveitar de alguma forma.

Um homem nunca deve sentir vergonha de admitir que errou, o que é apenas dizer, noutros termos, que hoje ele é mais inteligente do que era ontem.

Alexander Pope

RESUMO

SOUSA, Vinícius Braga da Silveira. **Avaliação de aspectos operacionais de aterros sanitários**: estudo de casos. 2022. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

A disposição final de resíduos sólidos é um dos grandes problemas enfrentados pela população mundial atualmente e afeta cada pessoa individualmente, podendo gerar impactos socioambientais. Em 2020, estavam em operação no Brasil, 652 aterros sanitários, e ainda que os aterros sanitários devessem ser utilizados apenas para a disposição final de rejeitos, isso não acontece. Um dos principais impactos causados pela disposição de resíduos sólidos em locais inapropriados é a contaminação de solos e águas superficiais e subterrâneas pelo lixiviado. Para garantir que os lixiviados gerados nos aterros sanitários não entrem em contato direto com a natureza, além do sistema de impermeabilização de base, são implantados sistemas de drenagem de lixiviados, responsáveis por captar os líquidos, conduzindo-os para tratamento. Portanto, através de visitas técnicas realizadas com um roteiro estruturado em seis aterros sanitários de médio e grande porte, foi possível entender como estão sendo implantados e o funcionamento destes sistemas de drenagem de lixiviados, assim como potenciais problemas causados por deficiências nestes sistemas. Foi observada uma deficiência no monitoramento geotécnico em relação ao controle de pressões internas do maciço de resíduos em todos os seis aterros sanitários. Todos apresentam condições adequadas de operação, porém não é possível afirmar que os sistemas de drenagem de lixiviados terão uma vida útil de serviço que atenda toda a fase de operação e pós-encerramento dos aterros sanitários. Verificou-se também que há dificuldade em analisar em campo as falhas e problemas ocasionados, uma vez que os componentes dos sistemas de drenagem estão aterrados junto dos resíduos, o que dificulta o acesso a esses locais para visualizar e analisar o que está ocorrendo.

Palavras-chave: Líquidos Lixiviados. Drenagem. Aterros Sanitários. Resíduos Sólidos. Chorume.

ABSTRACT

SOUSA, Vinícius Braga da Silveira. **Evaluation of landfill operating aspects**: case studies. 2022. 103 f. Dissertation (Master in Environmental Engineering) - School of Engineering, Rio de Janeiro State University, Rio de Janeiro, 2022.

The final disposal of solid waste is one of the major problems faced by the world population today and affects each person individually, and can generate social and environmental impacts. In 2020, 652 landfills were in operation in Brazil and even though landfills should be used only for the disposal of reject, this does not happen. One of the main impacts caused by the disposal of solid waste in inappropriate locations is the contamination of soil and surface and groundwater by leachate. To ensure that the leachates generated in landfills are not in direct contact with nature, besides the base impermeabilization system, leachate drainage systems are implemented, responsible for capturing the liquids, conducting them to treatment. Therefore, through technical visits made with a structured script in six medium and large sanitary landfills, it was possible to understand how these leachate drainage systems are being implemented and how they work, as well as potential problems caused by deficiencies in these systems. A deficiency was observed in the geotechnical monitoring in relation to the control of internal pressures of the waste massif in all six landfills. All present adequate operating conditions, but it is not possible to affirm that the leachate drainage systems will have a useful service life that attends the entire operation and post-closure phase of the landfills. It was also found that there is difficulty in analyzing in the field the failures and problems caused, since the components of the drainage systems are landfilled next to the waste, which makes it difficult to access these locations to visualize and analyze what is happening.

Keywords: Leachate. Drainage. Landfill. Solid Waste.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Composição gravimétrica dos resíduos. Fonte: Adaptado de Vergara e Tchobanoglous, 2012.....	19
Figura 2 - Representação do tipo de destinação final dada aos RSU. Fonte: ABRELPE, 2021.	27
Figura 3 - Destinação final de RSU para disposição sobre o solo. Fonte: Adaptado de SNIS, 2020.	27
Figura 4 - Destinação Final de RSU por Município em 2019. Fonte: Adaptado de SNIS, 2020.	28
Figura 5 - Destinação final de RSU por quantidade disposta sobre o solo. Fonte: Adaptado de SNIS, 2021.	29
Figura 6 - Configurações de impermeabilização de base em um aterro sanitário. Fonte: Ribeiro, 2016.	35
Figura 7 - Tipos de configuração do sistema de drenagem de base. Fonte: Adaptado de Neto, 2005.	37
Figura 8 - Esquema típico de um dreno com tubulação. Fonte: Autor.	37
Figura 9 - Esquema típico de um dreno cego. Fonte: Autor.	38
Figura 10 - Esquema típico de um dreno vertical. Fonte: Autor.	38
Figura 11 - Configuração típica de uma camada final de cobertura. Fonte: Autor.	40
Figura 12 – Valores de coeficiente de permeabilidade. Fonte: A. Casagrande e R. E. Fadum (1940).....	40
Figura 13 - Fluxo lateral e vertical de lixiviados considerando aterros sanitários com alturas iguais a: (a) 15 m, (b) 20 m e (c) 35 m. Fonte: Adaptado de Trapani <i>et al.</i> (2015).	51
Figura 14 - Frente operacional de descarga e compactação dos resíduos. As linhas vermelhas destacam o início e o final da rampa. O círculo branco destaca os resíduos aguardando serem espalhados e compactados. Os tubos em PEAD estão envoltos por pedra rachão e tela metálica (destacada em laranja). Fonte: Autor.	54
Figura 15 - Escavação de vala para a implantação de drenagem de lixiviados (à esquerda da foto) e na direita os resíduos que foram retirados para abertura da vala. Fonte: CTR.	55
Figura 16 - Comparativo entre a quantidade de resíduos recebidos e a geração de lixiviados. Fonte: Autor.....	57
Figura 17 - Exemplo de utilização de manta de sacrifício. Fonte: Google.	60

Figura 18 - Cobertura intermediária com geomembrana PEAD. Fonte: CTR.	62
Figura 19 - Cobertura final com grama na parte inferior, representando uma camada final do aterro sanitário e camadas intermediárias nas porções superiores. Fonte: CTR.	64
Figura 20 - Inversão do greide em direção ao pé do talude. Fonte: CTR.....	66
Figura 21 - Drenagem de águas pluviais com geomembrana de PEAD. Fonte: CTR.....	66
Figura 22 - Desenho ilustrativo de utilização de leiras na drenagem pluvial provisória. Fonte: Autor.	67
Figura 23 - Sequência de implantação da drenagem pluvial. Fonte: CTR.	68
Figura 24 - Caixa de passagem de águas pluviais e colchão reno para descida d'agua. Fonte: CTR.....	68
Figura 25 - Preparação e aplicação da impermeabilização de base. Fonte: CTR.	70
Figura 26 - Croqui esquemático da preparação da impermeabilização de base. Fonte: Autor.	70
Figura 27 - Croqui esquemático do dreno principal acima da camada de proteção mecânica. Fonte: Autor.....	72
Figura 28 - Croqui esquemático do dreno principal escavado no solo. Fonte: Autor.	73
Figura 29 - Croqui esquemático do dreno principal escavado na camada de proteção mecânica. Fonte: Autor.....	73
Figura 30 - Leito de brita para acomodação da tubulação do dreno principal. Fonte: CTR. ...	74
Figura 31 - Dreno principal no meio da área com tubulação e secundários direcionando os lixiviados ao dreno principal. Fonte: CTR.	74
Figura 32 - Geotêxtil não tecido envolvendo os drenos de base. Fonte: CTR.....	75
Figura 33 - Saturação nos resíduos e no geotêxtil. Fonte: Adaptado de Liu <i>et al.</i> (2018).....	76
Figura 34 - Croqui esquemático da drenagem de lixiviados entre camadas. Fonte: CTR.....	80
Figura 35 - Implantação de dreno horizontal ligando um dreno vertical ao outro. Fonte: CTR.	80
Figura 36 - Croqui esquemático da construção do dreno vertical no CTR-6. Fonte: CTR.....	81
Figura 37 - Croqui esquemático da implantação de um dreno de pé de talude. Fonte: CTR... ..	82
Figura 38 - "Cupinzeiro" para proteção dos drenos verticais. Fonte: CTR.	85
Figura 39 - Afloramento de lixiviados na face do talude. Fonte: CTR.	86
Figura 40 - Afloramento de lixiviados na berma. Fonte: CTR.....	87
Figura 41 - Dreno de face de talude ligando um dreno de pé de talude ao dreno vertical. Fonte: CTR.....	88
Figura 42 - Implantação do dreno de pé de talude, na primeira parte o dreno aberto com o meio drenante e após a aplicação do geotêxtil não tecido. Fonte: CTR.	89

Figura 43 - Imagens de microscópio de amostras de geotêxtil (a) e areia (b) de uma célula experimental de aterro sanitário. Fonte: Junqueira <i>et al.</i> , 2006.....	93
Figura 44 - Geotêxtil antes e após o teste de filtração. Fonte: Liu <i>et al.</i> , 2018.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos na cidade do Rio de Janeiro em 2019 e 2020. Fonte: Adaptado de COMLURB (2020).	20
Tabela 2 - Composição gravimétrica dos resíduos de cinco cidades do estado do Rio de Janeiro. Fonte: Adaptado de Conde (2021).	20
Tabela 3 - Teor de umidade dos RSU. Fonte: Adaptado de Carvalho (1999).	21
Tabela 4 - Teor de umidade médio de RSU. Fonte: Adaptado de Denardin (2019).	22
Tabela 5 - Valores de peso específico de resíduos dispostos em aterros sanitários. Fonte: Diversos autores.	24
Tabela 6 - Coeficiente de permeabilidade dos RSU. Fonte: Adaptado de Boscov (2008).	25
Tabela 7 - Relação dos fatores que influenciam na produção de lixiviado. Fonte: Adaptado de Dominoni (2020).	42
Tabela 8 - Fatores utilizados no cálculo de cada um dos métodos de estimativa de geração de lixiviados. Fonte: Adaptado de Dominoni (2020).	43
Tabela 9 - Roteiro estruturado para as visitas técnicas. Fonte: Autor.	46
Tabela 10 - Informações sobre classificação e quantidade de resíduos. Fonte: Autor.	49
Tabela 11 - Informações sobre a vida útil e tempo de operação. Fonte: Autor.	50
Tabela 12 - Informações sobre as características físicas dos aterros sanitários. Fonte: Autor.	50
Tabela 13 – Verificação de massa específica. Fonte: Autor.	52
Tabela 14 - Informações sobre pluviosidade e vazão média de lixiviados. Fonte: Autor.	56
Tabela 15 - Material de recobrimento. Fonte: Autor.	58
Tabela 16 - Cobertura diária dos resíduos. Fonte: Autor.	59
Tabela 17 - Cobertura intermediária dos resíduos. Fonte: Autor.	60
Tabela 18 - Cobertura final dos resíduos. Fonte: Autor.	63
Tabela 19 - Sistema de drenagem pluvial. Fonte: Autor.	65
Tabela 20 - Tipo de sistema de drenagem de base. Fonte: Autor.	71
Tabela 21 - Possibilidade de manutenção e monitoramento do sistema de drenagem de base. Fonte: Autor.	77
Tabela 22 - Tipo de sistema de drenagem entre camadas. Fonte: Autor.	79
Tabela 23 – Aterros sanitários que utilizam dreno de pé. Fonte: Autor.	82
Tabela 24 - Situação da operação em dias de chuvas. Fonte: Autor.	84
Tabela 25 - Ações emergências em casos de afloramento de lixiviados. Fonte: Autor.	87

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresa de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
EPA	United States Environmental Protection Agency
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
ONU	Organização das Nações Unidas
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCC	Resíduos de Construção Civil
RCS	Resíduos de Comércio e Serviços
RPU	Resíduos de Limpeza Pública
RSS	Resíduos de Serviços de Saúde
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SUASA	Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	14
1. OBJETIVOS	17
1.1 Objetivo Geral	17
1.2 Objetivos Específicos	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 Caracterização dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	18
2.1.1 Gravimetria.....	18
2.1.2 Teor de Umidade	21
2.1.3 Compactação e Permeabilidade	22
2.2 Métodos de Disposição Final de Resíduos Sobre o Solo	26
2.2.1 Aterros Sanitários.....	30
2.3 Projetos de Aterros Sanitários.....	31
2.3.1 Sistema de Impermeabilização.....	34
2.3.2 Sistema de Drenagem de Biogás e Lixiviados	36
2.3.3 Sistema de Cobertura de Resíduos	39
2.3.4 Sistema de Drenagem Superficial	41
2.4 Metodologia de Estimativa de Geração de Lixiviados.....	41
3. METODOLOGIA	44
3.1 Escolha dos Locais.....	44
3.2 Roteiro Estruturado	45
3.3 Visitas Técnicas	47
3.4 Análise de Dados	48
4. RESULTADOS E ANÁLISES	49
4.1 Informações Preliminares	49
4.2 Monitoramento Operacional	52
4.3 Sistema de Recobrimento de Resíduos	57
4.4 Sistema de Drenagem de Águas Pluviais.....	64
4.5 Sistema de Drenagem de Lixiviados de Base.....	69
4.6 Sistema de Drenagem de Lixiviados entre Camadas	78
4.7 Ações Emergenciais.....	83
4.7.1 Operações em Dias de Chuva	83

4.7.2	Ações para Solução de Afloramentos.....	86
4.8	Discussão dos Resultados.....	89
	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	97
	REFERÊNCIAS.....	99

INTRODUÇÃO

A disposição final de resíduos sólidos é um dos grandes problemas enfrentados pela população mundial atualmente e afeta cada pessoa individualmente, podendo gerar impactos socioambientais de grandes proporções, desde a disposição em locais ambientalmente inadequados acarretando em poluição de solos e águas, até mesmo acidentes devido à operação inadequada de aterros sanitários.

A população mundial atualmente é composta por aproximadamente 7,7 bilhões de pessoas e com estimativa de chegar a aproximadamente 9,7 bilhões de pessoas em 2050 (ONU, 2019). O crescente aumento da população mundial acarreta em uma maior geração de resíduos devido ao consumo, causando maior pressão no setor de disposição final de resíduos.

De acordo com um Relatório publicado pelo Banco Mundial em 2018 (*What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*), apenas no ano de 2016 se estima que foram geradas 2,01 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU), sem considerar outros tipos de resíduos. Desse montante total, de forma conservadora, 33% dos resíduos são dispostos de maneira ambientalmente inadequada. Para o ano de 2050, o mesmo estudo estima uma geração de 3,4 bilhões de toneladas considerando as mesmas condições do ano de 2016.

Analisando a situação do Brasil, os problemas com a disposição final de resíduos são expressivos, uma vez que vazadouros, comumente chamados de “lixões”, ou ainda aterros controlados, serem ainda muito utilizados para a destinação final dos resíduos sólidos.

Em 2020, estavam em operação no país 1.545 lixões (30,8%), 617 aterros controlados (12,3%), 652 aterros sanitários (13,0%) e o restante recebem outros tipos de destinação final, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), o qual contou com a adesão de 4.589 municípios (82,4% dos 5.570 do país).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), criada pela Lei Federal N° 12.305 (Brasil, 2010), tem alguns pontos a serem ressaltados no quesito de disposição final de resíduos sólidos. Primeiro foi estabelecido um prazo de quatro anos para o encerramento e paralisação da utilização dos lixões, ou seja, em 2014, todos os lixões do Brasil deveriam ter sido encerrados e, conseqüentemente, empregadas ações para sua remediação.

Em 2020, com a publicação da Lei Federal N° 14.026 (Brasil, 2020) que atualiza o marco legal do saneamento básico, em seu artigo 54 estabelece prazos para os municípios realizarem a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, assim como ainda

estabelece que estados e municípios deverão realizar a cobrança dos serviços de manejo de resíduos.

O segundo ponto é a utilização de aterros sanitários apenas para a disposição final de rejeitos. Segundo a PNRS, são considerados rejeitos os materiais que foram esgotadas todas as possibilidades de reaproveitamento e deverão ser dispostos em aterros sanitários.

Ainda que os aterros sanitários devessem ser utilizados apenas para a disposição final de rejeitos, isso não acontece, pois necessita que exista toda uma cadeia de serviços afins para o reaproveitamento dos resíduos, seja a reciclagem, compostagem e ainda a reutilização. Contudo, o que ocorre é a utilização dos aterros sanitários para o recebimento de qualquer tipo de resíduos sólidos.

Historicamente, a principal forma de destinação final de resíduos sólidos é a disposição sobre o solo. Inicialmente foi realizada sem nenhum tipo de cuidado com os impactos ambientais gerados pela atividade como, no caso dos lixões, e posteriormente, com a adoção de medidas de proteção ambiental, como os equipamentos e técnicas utilizadas na implantação e operação de aterros sanitários.

No cenário nacional, a principal forma adotada de destinação final ambientalmente adequada de resíduos sólidos é o aterro sanitário, sendo a mais econômica e que incorpora planejamento, projeto, operação, monitoramento, encerramento e pós-encerramento (TCHOBANOGLIOUS, 2002).

Um dos principais impactos causados pela disposição de resíduos sólidos em locais inapropriados é a contaminação de solos e águas superficiais e subterrâneas pelo lixiviado. O lixiviado é um líquido gerado a partir da percolação de águas pluviais pelo maciço de resíduos, assim como a própria água presente nos resíduos, que entram em contato com uma grande variedade de constituintes químicos presentes nos materiais dispostos e derivados das reações químicas e bioquímicas que ocorrem nos aterros sanitários (TCHOBANOGLIOUS, 2002).

Os aterros sanitários são preparados para proteger os solos e águas utilizando um sistema de impermeabilização de base, composto por camadas de solo com baixa permeabilidade e de material sintético (geomembrana de Polietileno de Alta Densidade), colaborando para criar uma barreira física, impedindo o contato do lixiviado com as áreas não impermeabilizadas e preparadas para recebimento dos resíduos.

Para garantir que os lixiviados gerados nos aterros sanitários não entrem em contato direto com a natureza, além do sistema de impermeabilização de base, são implantados sistemas de drenagem de lixiviados, responsáveis por interceptar e captar os líquidos, conduzindo-os, através de tubulações, para o local de acumulação e ou tratamento. Assim, os lixiviados são

removidos dos aterros sanitários e tratados para serem reutilizados ou então descartados de forma ambientalmente adequada.

O correto dimensionamento, execução e operação do sistema de drenagem de lixiviados auxiliam na segurança geotécnica dos aterros sanitários, assim como garante que os lixiviados sejam coletados e tratados ao invés de retidos dentro dos aterros sanitários. Em alguns casos, em que o sistema de drenagem de lixiviados não seja eficiente, existe a possibilidade de extravasamentos destes, podendo causar contaminação devido ao contato com o solo e águas.

No Brasil, grande parte de sua porção territorial está localizada em zona tropical e que apresenta altos índices de pluviosidade, variando entre 250 a 2.000 mm por ano (EMBRAPA, 2022). Portanto, se faz necessário garantir um correto funcionamento do sistema de drenagem de lixiviados, evitando que os lixiviados possam causar impactos ambientais, e, contribuindo ainda para evitar que a presença de grandes quantidades de líquidos no maciço de resíduos seja responsável por causar problemas de estabilidade, ocasionando acidentes que podem provocar deslizamentos e rompimentos de tais maciços.

Nesse contexto, o presente trabalho pretende apresentar dados e informações sobre aterros sanitários, nos quesitos relacionados às rotinas operacionais assim como em específico, o funcionamento dos sistemas de drenagem de lixiviados, contribuindo para um melhor atendimento do assunto com base em dados e figuras reais, já que há uma escassez de literatura disponível sobre o assunto.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é avaliar a implantação e aspectos operacionais, com ênfase em drenagem de lixiviados, de seis aterros sanitários no Brasil.

1.2 Objetivos Específicos

- I. Realizar visitas técnicas a seis aterros sanitários em operação no Brasil com ênfase no sistema de drenagem de lixiviados;
- II. Desenvolver e aplicar um roteiro estruturado para as visitas técnicas considerando as condições de implantação e operacionais dos aterros sanitários;
- III. Investigar a execução e funcionamento dos sistemas de drenagem de lixiviados a partir de relatos técnicos e observações de campo;
- IV. Discutir aspectos que podem influenciar no funcionamento dos sistemas de drenagem de lixiviados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Caracterização dos Resíduos Sólidos Urbanos

A caracterização dos resíduos sólidos urbanos é importante para entender como pode afetar as rotinas operacionais e os sistemas de drenagem e tratamento de lixiviados em aterros sanitários, uma vez que suas características e carga orgânica são principais contribuintes na geração de lixiviados com potencial poluidor. Este é também o principal tipo de resíduo disposto em aterros sanitários.

De acordo com a Associação Brasileira de Empresa de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), na publicação do último Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil referente ao ano de 2020 (ABRELPE, 2021), no Brasil foi gerado um total de aproximadamente 82 milhões de toneladas de RSU, no entanto, apenas 92,2% do montante total foram coletados, ou seja, 76 milhões de toneladas de resíduos. Os dados publicados no Diagnóstico de Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos de 2020, elaborado pelo Ministério de Desenvolvimento Regional (MDR), então responsável pelo gerenciamento do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), apresentou uma quantidade total de 66,6 milhões de toneladas de RSU coletados (SNIS, 2021).

Importante salientar que no caso do SNIS, o sistema funciona de acordo com os dados apresentados pelos gestores públicos, de forma voluntária. Já a ABRELPE, apresenta dados de empresas privadas e que muitas vezes prestam serviços de coleta, transporte e destinação final de resíduos para os entes públicos.

2.1.1 Gravimetria

A composição gravimétrica dos resíduos, sendo estes uma massa heterogênea composta de vários materiais, consiste em realizar a partir dos componentes presentes, em massa, quais frações são mais representativas. A correta caracterização dos parâmetros físicos e mecânicos dos resíduos são de grande importância no projeto e operação quando considerados os problemas geotécnicos e de tratamento de lixiviados em aterros sanitários.

Alguns fatores podem influenciar na variabilidade da composição gravimétrica dos resíduos, como estação do ano, condições econômicas e sociais, hábito alimentares, o mercado de reutilização, recuperação e reciclagem de resíduos da região (MENEZES *et al.*, 2019).

Considerando a situação do Brasil, assim como em outros países em desenvolvimento, os resíduos sólidos urbanos são compostos em quase metade de sua massa total por resíduos orgânicos.

Vergara e Tchobanoglous (2012) compilaram os dados presentes na Figura 1, composta por resultados de caracterização gravimétrica de resíduos sólidos urbanos em vários locais do mundo, o que representa uma parcela da população com variados hábitos alimentares, diferentes condições econômicas, sociais e ambientais.

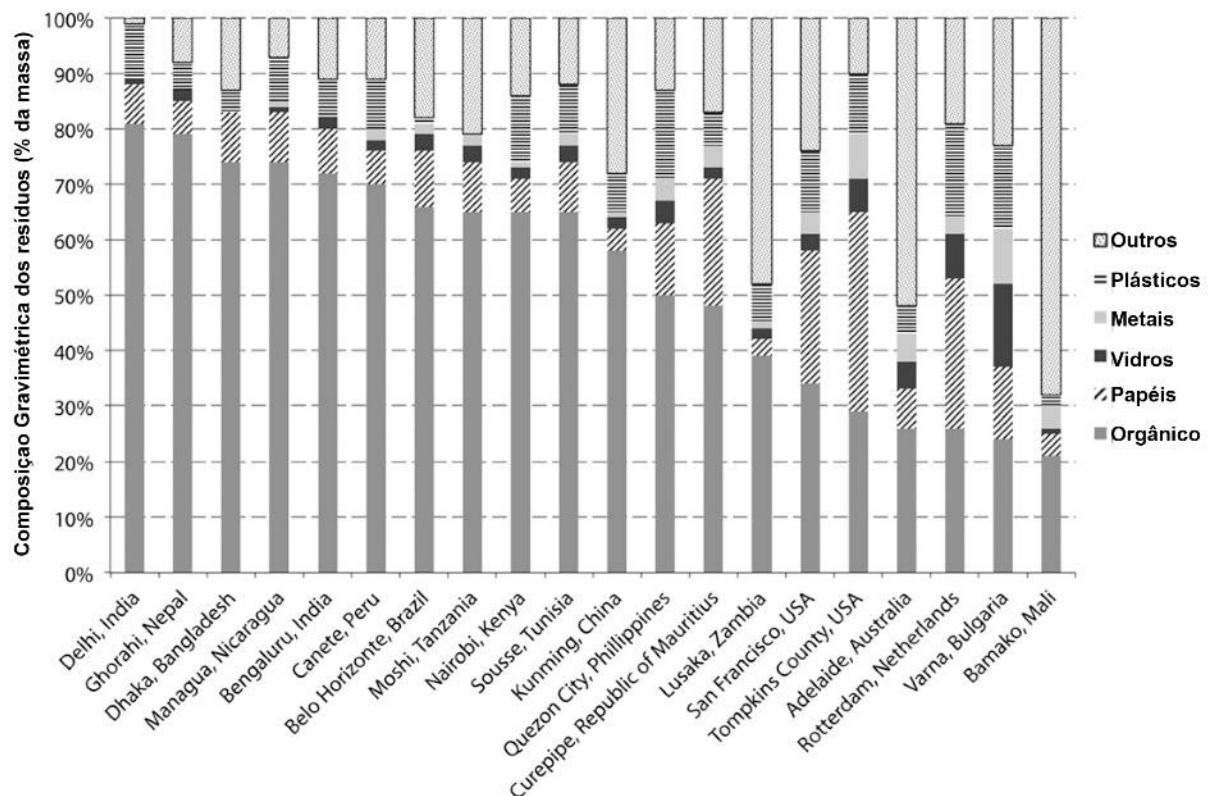


Figura 1 - Composição gravimétrica dos resíduos. Fonte: Adaptado de Vergara e Tchobanoglous, 2012.

Em países mais desenvolvidos, como os da Europa, Austrália e Estados Unidos, é possível verificar menores quantidades de resíduos orgânicos, enquanto em países em desenvolvimento, o cenário é contrário, contando com maior quantidade de resíduos orgânicos, isto também significa maior teor de umidade (VERGARA e TCHOBANOUGLOS, 2012), podendo gerar mais lixiviados nos aterros sanitários.

Os processos de degradação da parcela orgânica dos resíduos envolvem transformações biológicas, físicas e químicas, e se traduzem em mudanças de estado sólido para os estados gasosos e líquidos, o que significa que os resíduos estão passando por diminuição no seu

tamanho e cada vez em partículas menores, além de ocorrerem mudanças de formatos (ABREU, 2015).

Considerando estudos realizados no Brasil, a COMLURB (2020) apresentou a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos gerados na cidade do Rio de Janeiro, considerando ainda as variações que aconteceram devido à mudança de comportamentos gerados pela pandemia do novo coronavírus em 2020.

Os valores apresentados na Tabela 1 ao se comparar com a Figura 1, apresenta semelhanças com os dados obtidos em países de condições econômicas financeiras parecidas com o Brasil, onde a composição dos resíduos sólidos urbanos é, em sua maior parte, composta por matéria orgânica, papel e plástico.

Tabela 1 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos na cidade do Rio de Janeiro em 2019 e 2020.

Fonte: Adaptado de COMLURB (2020).

Valores em %	2019	2020
Matéria Orgânica	47,97	43,55
Papel	14,73	16,86
Vidro	3,87	4,71
Metal	1,89	1,55
Plástico	15,31	15,85
Outros	16,23	17,48

Outros dados sobre a composição gravimétrica dos resíduos em outros municípios do estado do Rio de Janeiro foram pesquisados por Conde (2021), apresentando valores de matéria orgânica próximos ao estudo da COMLURB, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição gravimétrica dos resíduos de cinco cidades do estado do Rio de Janeiro. Fonte: Adaptado de Conde (2021).

Cidade	Tipo de resíduo	Orgânico	Reciclável	Diversos
Barra Mansa	RSU	34,8	40,4	24,9
Duque de Caxias	RSU	43,3	32,3	24,4
Nova Iguaçu	RSU	42,6	39,7	17,7
São Gonçalo	RSU	42,6	39,7	17,7
Volta Redonda	RSU	38,1	37,1	24,8

2.1.2 Teor de Umidade

Os resíduos sólidos urbanos, por serem compostos por uma diversidade de componentes, apresentam uma variabilidade grande de teores de umidade já que cada um destes componentes tem uma capacidade diferente de retenção de líquidos em seus vazios, o que causa essa variação nos valores de umidade.

Carvalho (1999) apresentou os seguintes teores de umidade para os componentes do RSU, em porcentagem, considerando base seca e úmida, onde base seca é aquela que é realizado o cálculo a partir dos resíduos que passaram por um processo de secagem, enquanto base úmida considera o peso total do resíduo incluindo a sua umidade, sem passar por um processo de secagem. Os dados estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3 - Teor de umidade dos RSU. Fonte: Adaptado de Carvalho (1999).

Componentes	Umidade (%)	
	Base seca	Base úmida
Metais	19,60	16,40
Papel	74,80	42,80
Vidro	5,90	5,57
Plástico	41,50	29,30
Borracha	24,50	19,60
Têxteis	55,00	35,50
Pedra	12,60	11,20
Madeira	69,80	41,10
Porção Orgânica	47,00	32,00

Em teste realizado por Denardin (2019), o teor de umidade foi estudado considerando diferentes períodos de tempo após a disposição dos resíduos no aterro sanitário objeto do estudo, obtendo uma média do teor de umidade de oito amostras coletadas, conforme dados presentes na Tabela 4.

Tabela 4 - Teor de umidade médio de RSU. Fonte: Adaptado de Denardin (2019).

Componentes	Umidade (%)	
	Base seca	Base úmida
Matéria Orgânica	62,60	36,70
Papelão	60,10	36,00
Resíduos Sanitários	56,80	34,90
Têxtil	54,80	33,30
Papel	47,40	30,00
Embalagem Acartonada	45,40	30,80
Plástico Mole	42,80	29,00
Alumínio	39,80	27,00
Couro, borracha e madeira	28,50	20,50
Plástico Duro	20,30	16,20
Sucata e Lata de ferro	7,00	6,50
Vidro	1,20	1,20

Na Tabela 3 e Tabela 4, a maior parte do teor de umidade está relacionada à matéria orgânica, tanto em base seca quanto úmida. Outros componentes também contribuem no aumento do teor de umidade por serem capazes de absorver líquidos ou ainda armazenar em seu interior, como no caso de alumínio, papéis e plásticos.

Considerando o teor de umidade dos resíduos após serem dispostos em aterro sanitário, Boscov (2008), compilou dados de diversos autores e concluiu que não é possível observar uma tendência nítida de variação do teor de umidade em função da profundidade nos maciços. Diz ainda que diversos fatores como a entrada de água de chuva pela cobertura, geração de chorume e condições internas de drenagem do maciço, podem influenciar e criar essa variação do teor de umidade do resíduo no maciço.

2.1.3 Compactação e Permeabilidade

Segundo Motta (2011), a compactação dos RSU é sua densificação, ou a redução do seu índice de vazios, realizada através do emprego de equipamentos mecânicos, como tratores de esteira, utilizando a carga aplicada devido às passadas deste equipamento sobre os resíduos

dispostos. A própria carga das camadas de resíduos sobrepostas também contribui com a redução do volume pela compactação das camadas inferiores.

A compactação dos resíduos faz parte do controle operacional dos aterros sanitários, seja devido ao controle de sua vida útil ou a segurança estrutural do maciço de resíduos. A otimização dos processos de compactação dos resíduos é de suma importância, uma vez que afeta a quantidade de resíduos possíveis de serem dispostos, o que acarreta um melhor aproveitamento de espaço volumétrico do aterro sanitário. O principal objetivo é a redução do volume que os resíduos dispostos no aterro sanitário ocupam, o que contribui também com o aumento de sua estabilidade estrutural.

Catapreta (2008) diz que a compactação deve ser controlada e que depende de inúmeros fatores, como:

- Tipo de equipamentos utilizados;
- Gravimetria e umidade dos resíduos dispostos;
- Modo de disposição de resíduos seja subindo (*uphill*) ou descendo (*downhill*) a rampa;
- Controle de espessura das camadas dos resíduos dispostos;
- Inclinação da rampa de compactação;
- Condições climáticas durante a operação. (BOSCOV & ABREU, 2000; SAVAGE *et al.*, 1998; e CATERPILLAR, 2001).

As vantagens de uma boa compactação são: aumento da vida útil dos aterros sanitários, redução da migração descontrolada de gases e lixiviados, diminuição da vazão de lixiviados, aumento da estabilidade do maciço de resíduos, a possibilidade de tráfego imediato dos veículos sobre o maciço e melhorias no aspecto estético do maciço de resíduos (Catapreta, 2008).

Na literatura disponível, muitos autores publicaram valores de peso específico dos resíduos após serem dispostos em aterros sanitários, variando de valores baixos como 2,75 kN/m³ até 17,0 kN/m³, conforme pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de peso específico de resíduos dispostos em aterros sanitários. Fonte: Diversos autores.

Autor (ano)	Peso específico após compactação (kN/m³)
Landva & Clark (1990)	7,0 e 14,0
Fassett <i>et al.</i> (1994)	3,0 a 10,7
Kaimoto e Cepollina (1996)	9,0 a 13,0
König & Jessberger (1997)	3,0 a 17,0
Gomes <i>et al.</i> (1997)	7,0 a 9,0
Marques (2001)	3,4 e 14,0
Caterpillar (2001)	2,75 e 7,0
Fakher (2006)	4,5 e 8,5
Catapreta & Simões (2007)	7,0 a 11,0

Uma das grandezas físicas afetadas diretamente pela taxa de compactação empregada e consequente diminuição do índice de vazios é a permeabilidade, uma propriedade do solo de permitir o escoamento, ou percolação, de água através dele. A permeabilidade é mensurada através do coeficiente de permeabilidade, identificado pela variável “k” que indica uma maior ou menor facilidade da água percolar através do solo. O valor desta variável pode ser obtido de forma experimental utilizando a Lei de Darcy (Darcy, 1856).

Para a determinação da permeabilidade são utilizados ensaios de campo e de laboratório, os quais são realizados seguindo os procedimentos estabelecidos em normas técnicas brasileiras, notadamente, a NBR 13.292 “Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante” (ABNT, 1995) e NBR 14.545 “Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável” (ABNT, 2000).

Motta (2011) diz que a permeabilidade do resíduo é um importante dado de projeto e operação, porque ela intervém em um grande número de problemas práticos, contribuindo com o cálculo de estimativa da vazão de lixiviados usado no dimensionamento do sistema de drenagem, análises de recalques que estão relacionados com a redução do índice de vazios associado à perda de líquidos e gases, e nos estudos de estabilidade, visto que o aumento da poro-pressão irá diminuir o contato entre as partículas que compõem o meio drenante (princípio da tensão efetiva).

Dos coeficientes de permeabilidade à água verificados em aterros sanitários, Boscov (2008) apresenta os dados da Tabela 6 obtidos por diferentes métodos (a maioria *in situ*) e que

havia sido publicados por diversos autores. Os valores de coeficiente de permeabilidade variam de 10^{-6} a 10^{-4} m/s, valores esperados, analogamente, para solos arenosos, dependendo da condição de compactação. A tabela ainda apresenta valores de peso específico, os quais variam de 1,1 a 19,0 kN/m³, sendo a maioria por volta de 10 kN/m³.

Tabela 6 - Coeficiente de permeabilidade dos RSU. Fonte: Adaptado de Boscov (2008).

Pesquisador	Peso específico (kN/m³)	K (m/s)	Metodologia
Fungaroli et al. (1979)	1,1 a 4,0	10^{-5} a 2×10^{-4}	Lisímetros
Koriatas et al. (1983)	8,6	$3,15 \times 10^{-5}$ a $5,1 \times 10^{-5}$	Ensaio de Laboratório
Oweis e Khera (1986)	6,45	1×10^{-5}	Estimativa por meio de dados de campo
Brandl (1990)	11,0 a 16,0	3×10^{-7} a 5×10^{-6}	Ensaio <i>in situ</i>
Landva e Clark (1990)	10,1 a 14,4	10^{-5} a 4×10^{-4}	Ensaio <i>in situ</i>
Manassero (1990)	8,0 a 10,0	$1,5 \times 10^{-5}$ a $2,6 \times 10^{-4}$	Ensaio de Bombeamento
Oweis et al. (1990)	6,45 9,4 a 14 6,3 a 9,4	10^{-5} $1,5 \times 10^{-4}$ $1,1 \times 10^{-5}$	Bombeamento Ensaio <i>in situ</i> Ensaio <i>in situ</i>
Brandl (1994)	9,0 a 12,0 13,0 a 17,0	10^{-6} a 5×10^{-4} 3×10^{-8} a 2×10^{-6}	Ensaio de Laboratório Ensaio de Laboratório
Cepolina et al. (1994)	~10	1×10^{-7}	Ensaio de Bombeamento
Ehrlich et al. (1994)	8	1×10^{-5}	Ensaio <i>in situ</i> em furo de sondagem
Beaven e Powrie (1995)	5,0 a 13,0	10^{-7} a 10^{-4}	Ensaio de Laboratório
Gabr e Valero (1995)	-	10^{-7} a 10^{-5}	Ensaio de Laboratório
Blengino et al. (1996)	9,0 a 11,0	3×10^{-7} a 3×10^{-6}	Ensaio <i>in situ</i> a grande profundidade (30 a 10 m)
Jucá et al. (1996)	-	1×10^{-7}	Ensaio <i>in situ</i>
Mariano e Jucá (1998)	-	$1,89 \times 10^{-8}$ a $4,15 \times 10^{-6}$	Ensaio <i>in situ</i> em furo de sondagem
Santos et al. (1998)	14,0 a 19,0	10^{-5}	Ensaio <i>in situ</i> em furo de sondagem
Carvalho (1999)	8,0 a 15,0	5×10^{-8} a 8×10^{-6}	Ensaio de Laboratório
Aguiar (2001)	-	$9,39 \times 10^{-7}$ a $1,09 \times 10^{-6}$	Permeômetro de Guelph

Boscov (2008) explica que a permeabilidade dos RSU influencia diretamente a eficiência do sistema de drenagem de lixiviados e que permeabilidades baixas influenciam na

criação de bolsões de gás e lixiviados. Nestas situações de baixa permeabilidade dos RSU, podem se desenvolver pressões neutras que afetam a estabilidade do maciço.

Na faixa de valores de permeabilidade entre 10^{-8} a 10^{-6} m/s observada nos estudos realizados em aterros sanitários brasileiros, Boscov (2008) diz ser atribuída à maior fração de materiais putrescíveis nos RSU brasileiros. Os outros dados são originários de países mais desenvolvidos.

2.2 Métodos de Disposição Final de Resíduos Sobre o Solo

A destinação final de resíduos pode ser realizada de diversas maneiras, considerando a classificação dos resíduos, adotando tecnologias como a compostagem, incineração, coprocessamento, disposição sobre o solo, dentre outros.

Dentre as tecnologias disponíveis, a disposição sobre o solo engloba a disposição adequada (em aterros sanitários) e inadequada (em lixões e aterros controlados). Devido a menor complexidade operacional, de conhecimento técnico e implantação em comparação com outras tecnologias, esta acabou sendo a mais adotada no Brasil, considerando ainda a questão financeira como um fator de grande importância na escolha da tecnologia utilizada.

No Brasil, com o advento da PNRS, os municípios deveriam encerrar a utilização de lixões e aterros controlados, sendo obrigados a buscar formas de viabilizar a destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos, o que devido aos fatores abordados anteriormente, alavancou a adoção de aterros sanitários.

Devido ao cenário atual brasileiro em 2022, ainda que a PNRS preveja que os aterros sanitários sejam utilizados para disposição final apenas de rejeitos, estes acabam por receber grandes quantidades de resíduos que poderiam receber tratamento e serem destinados a fins, como a compostagem da parcela orgânica e reciclagem de plásticos e outros materiais.

Os RSU, que representam a maior parte da geração de resíduos sólidos no Brasil, são também os principais resíduos encaminhados para disposição final em aterros sanitários, lixões e aterros controlados.

Ainda nos dados apresentados pela ABRELPE referentes ao ano de 2020, foram contabilizadas aproximadamente 45 milhões de toneladas dispostas em locais ambientalmente adequados, 60,2% dos resíduos sólidos urbanos coletados, porém o restante, 30,2 milhões de toneladas de RSU foram dispostas em locais inadequados como lixões e aterros controlados, 39,8% do total, conforme apresentado na Figura 2 (ABRELPE, 2021).

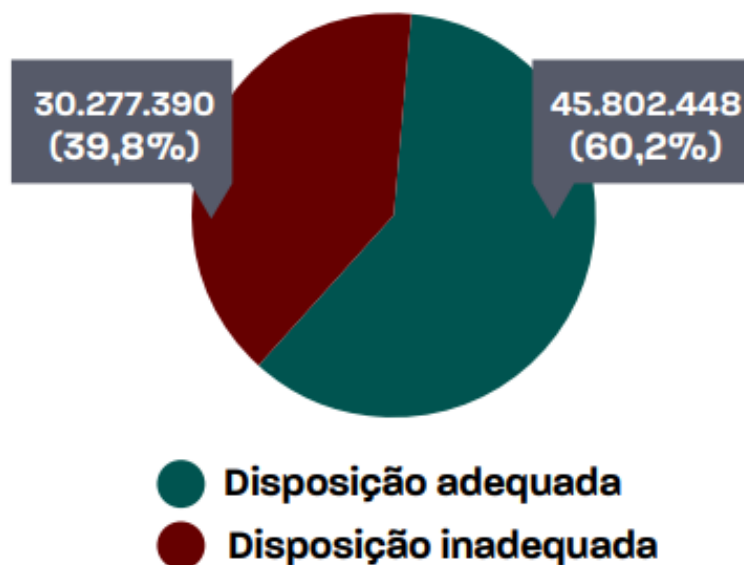


Figura 2 - Representação do tipo de destinação final dada aos RSU. Fonte: ABRELPE, 2021.

O SNIS, com base de dados do diagnóstico de 2019, apresentou que 48,13 milhões de toneladas de RSU foram dispostos em aterros sanitários, valor próximo ao observado nos dados apresentados pela ABRELPE, 8,24 milhões de toneladas de RSU foram enviados para lixões e 7,68 milhões de toneladas para aterros controlados, como pode ser visto na Figura 3. Somados todos os RSU encaminhados para disposição final sobre o solo, são 64,05 milhões de toneladas (SNIS, 2019).

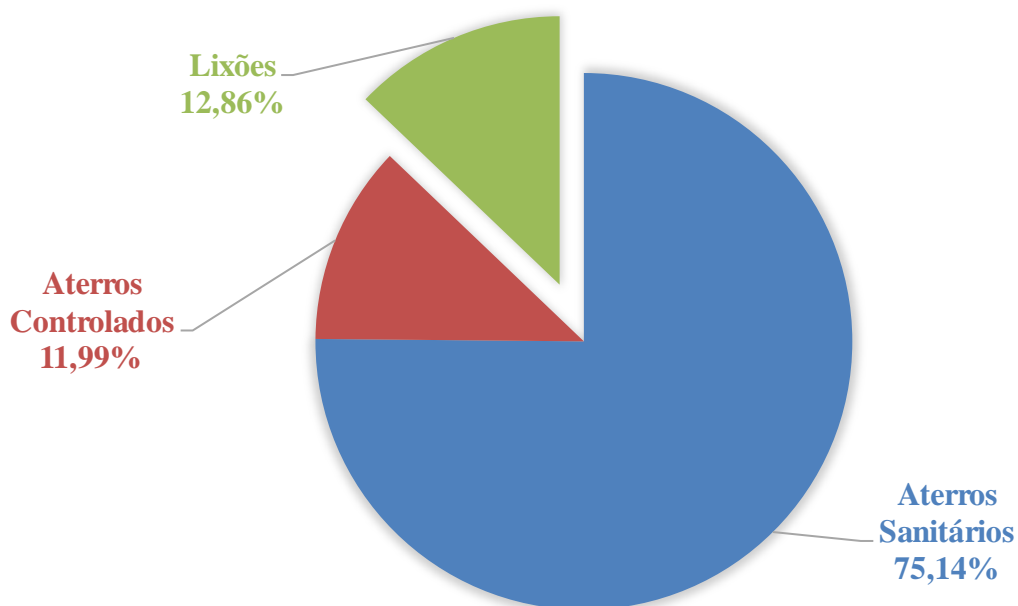


Figura 3 - Destinação final de RSU para disposição sobre o solo. Fonte: Adaptado de SNIS, 2020.

O diagnóstico do SNIS, apresenta ainda a forma de destinação final de RSU adotada por cada município declarante, como pode ser visto na Figura 4.

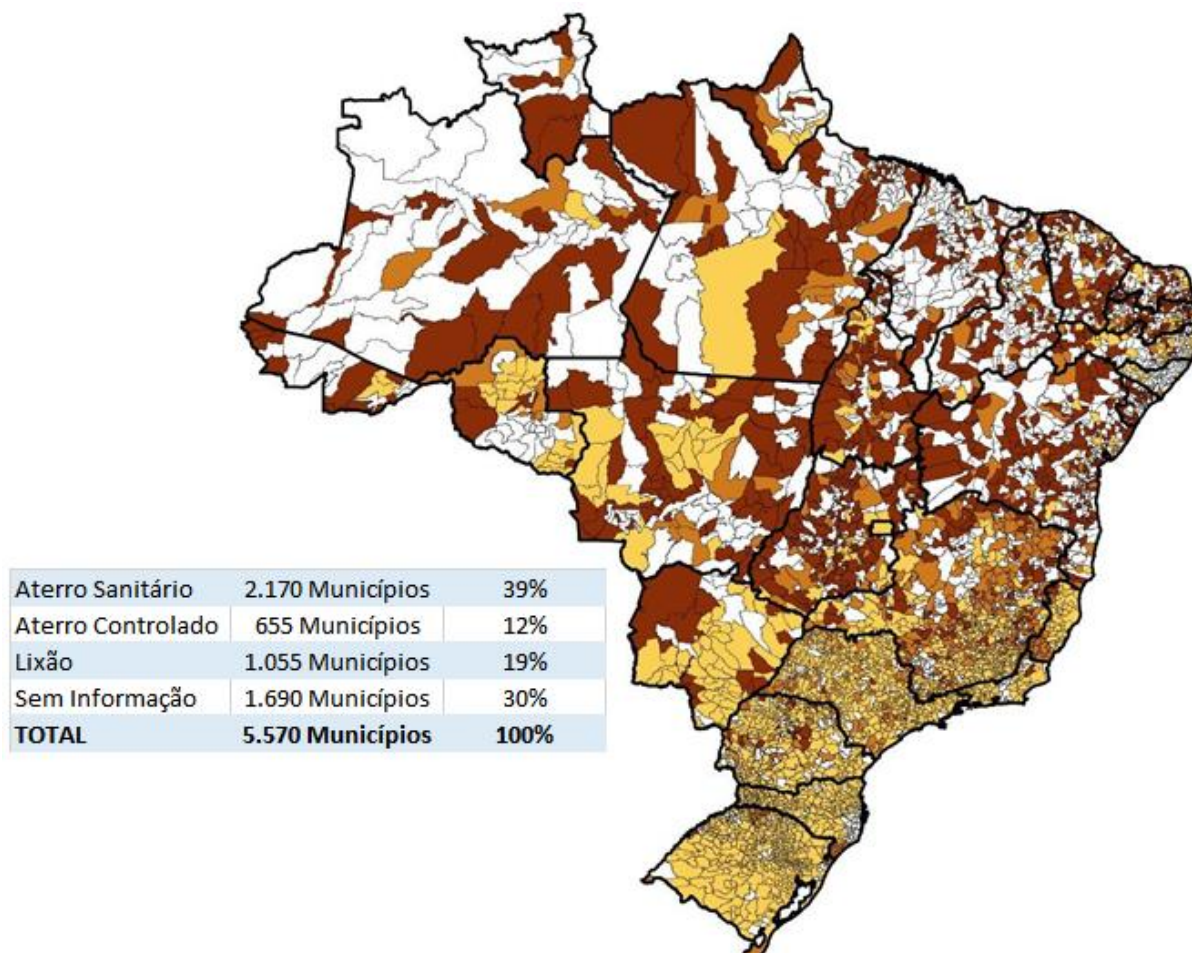


Figura 4 - Destinação Final de RSU por Município em 2019. Fonte: Adaptado de SNIS, 2020.

O diagnóstico de 2020 do SNIS apresentou que 48,17 milhões de toneladas de RSU foram dispostos em aterros sanitários, 9,55 milhões de toneladas de RSU foram enviados para lixões e 7,58 milhões de toneladas para aterros controlados, como pode ser visto na Figura 5. Somados todos os RSU encaminhados para disposição final sobre o solo, são 65,30 milhões de toneladas.

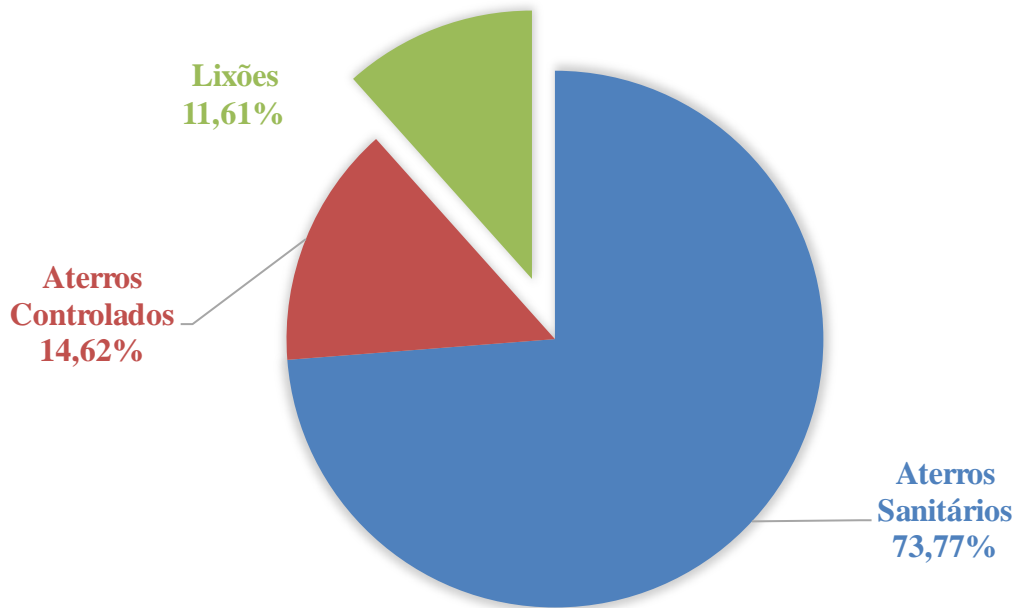


Figura 5 - Destinação final de RSU por quantidade disposta sobre o solo. Fonte: Adaptado de SNIS, 2021.

No ano de 2021, o diagnóstico do SNIS não apresentou a informação de disposição final sobre o solo por município declarante. Dessa forma, considerando os dados apresentados de disposição final sobre o solo por toneladas, e considerando ainda a informação de destinação final de RSU por município em 2019, esses 30% de municípios, que não prestaram informações, possivelmente utilizam formas inadequadas de destinação final de resíduos.

Nesse sentido, considerando as informações não declaradas e aquelas sobre a quantidade em toneladas de resíduos que são destinadas à aterros sanitários (73,77%), esse valor pode apresentar uma informação distante da realidade.

Considerando os dados de ambas as publicações, o Brasil ainda realiza muito a disposição final de maneira inadequada, utilizando locais como aterros controlados e lixões, notadamente reconhecidos por serem grandes causadores de impactos ambientais, uma vez que não apresentam as medidas adequadas para garantir da proteção ao meio ambiente e à saúde pública.

No pior dos cenários, em nível nacional, considerando as informações da ABRELPE e do SNIS, assim como a representatividade dos dados, apenas 60,2% dos resíduos coletados são destinados de forma ambientalmente adequada e considerando ainda que em ambas as publicações são contabilizados apenas os resíduos coletados pela administração pública ou empresas privadas de prestação de serviços.

2.2.1 Aterros Sanitários

O aterro sanitário enquanto tecnologia de disposição final de resíduos é considerada como ambientalmente adequada, tendo em vista todos os procedimentos e medidas adotadas que visam à garantia da proteção ambiental, em todas as etapas do empreendimento, desde o projeto, até implantação e operação, incluindo ainda o monitoramento do local mesmo após o encerramento das operações de aterramento de resíduos sólidos.

De acordo com a NBR 8.419 (ABNT, 1992), o aterro sanitário é uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada.

A PNRS define disposição final ambientalmente adequada como sendo a distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos (BRASIL, 2010).

Tchobanoglous (2002) define que aterro sanitário é uma obra de engenharia para disposição de RSU projetado e operado de forma a minimizar os impactos ao meio ambiente e a saúde pública.

Aterros sanitários possuem sistemas projetados especificamente com o objetivo de reduzir o potencial impacto ambiental que a atividade possa causar, sendo considerado um empreendimento em constante necessidade de manutenção e continuidade de implantação, até a sua finalização com o esgotamento da vida útil volumétrica. De forma geral, aterros sanitários possuem os seguintes itens (TCHOBANOGLIOUS, 2002):

- I. Sistema de impermeabilização de base: Responsável por conter o lixiviado para proteger as águas subterrâneas e o solo local;
- II. Sistema de drenagem de lixiviados de base: Responsável por interceptar, coletar e encaminhar os líquidos lixiviados que chegam à base e são direcionados para o sistema de tratamento de lixiviados;
- III. Sistema de drenagem de lixiviados e gases: Responsável por interceptar, coletar e encaminhar os lixiviados para o sistema de drenagem de base, e os gases para a superfície, sendo gerados ao longo de todo o maciço de resíduos e implantado conforme o avanço da operação;

- IV. Sistema de cobertura de resíduos: Responsável por diminuir a infiltração de águas pluviais, impedir o carreamento de resíduos pela ação eólica, dificultar o acesso de vetores e animais aos resíduos aterrados, impedir emissões fugitivas de gases de efeito estufa e contribui para o controle de odores.
- V. Sistema de drenagem pluvial: Responsável por coletar todas as águas pluviais que precipitam na área do aterro sanitário, encaminhando as águas para fora da área;
- VI. Sistema de tratamento de lixiviados: Responsável por receber e tratar os líquidos lixiviados provenientes do aterro sanitário.

Importante também definir alguns termos que são comumente utilizados para melhor entendimento dos aspectos operacionais dos aterros sanitários:

- I. Pátio de recepção: Local destinado a receber os veículos de transporte de resíduos para sua disposição final;
- II. Frente de serviço: Local onde os resíduos são dispostos e compactados utilizando equipamentos como tratores de esteira ou rolos compressores;
- III. Camada: Platôs de resíduos que possuem comumente entre 3 e 5 m de altura;
- IV. Célula: Conformação de resíduos dispostos diariamente em conjunto com a camada de recobrimento.

Ainda que este seja o método de disposição final de RSU considerado mais simples, ainda assim, exige cuidados especiais e técnicas específicas a serem seguidas, evitando que a incorreta operação acabe por impactar negativamente o aterro sanitário e acabe por transformá-lo em um lixão (CETESB, 2020).

Além das questões técnicas de implantação e operação, se faz necessário a adoção de dois importantes programas de monitoramento, sendo eles o monitoramento ambiental e o geotécnico. O monitoramento ambiental visa atender todas as legislações ambientais e exigências do licenciamento ambiental presentes nas licenças emitidas para o aterro sanitário, enquanto o monitoramento geotécnico realiza o controle de instrumentos e equipamentos com o intuito de garantir a segurança física local evitando deslizamentos e rupturas no maciço de resíduos.

2.3 Projetos de Aterros Sanitários

Para a elaboração de projetos de aterros sanitários no Brasil, três normas técnicas da ABNT podem ser utilizadas para auxiliar o responsável nos quesitos necessários e que muitas vezes são exigidos na etapa de licenciamento ambiental dos empreendimentos, são elas:

- a. NBR 8.419 – Apresentação de projetos de aterros sanitários (ABNT, 1992);
- b. NBR 13.896 – Aterros de resíduos não perigosos (ABNT, 1997);
- c. NBR 15.849 – Projetos de aterros sanitários de pequeno porte (ABNT, 2010).

Ainda que a NBR 15.849 (ABNT, 2010) seja apenas para projetos de pequeno porte, ainda assim, esta apresenta informações importantes para o desenvolvimento de projetos de portes maiores, como as características da área que será construído o aterro sanitário, proximidade à corpos hídricos e núcleos populacionais, dispositivos de monitoramento ambiental, exigências mínimas para a impermeabilização da base do aterro sanitário, dentre outros, além de ser uma norma técnica mais recente do que as outras, as quais não passaram, recentemente, por revisões de conteúdo.

Considerando as informações contidas nas três normas técnicas, todas possuem exigências parecidas quanto aos equipamentos necessários para o projeto, implantação e operação de aterros sanitários.

Em primeiro lugar, todas as normas técnicas abordam a questão da escolha da área para a implantação e operação do aterro sanitário, onde o local para ser utilizado deve ser tal que o impacto ambiental a ser causado pela instalação do aterro seja minimizado, a aceitação da instalação pela população seja maximizada, esteja de acordo com o zoneamento da região e possa ser utilizado por um longo período de tempo, necessitando apenas de um mínimo de obras para o início da operação (ABNT, 1997).

Esta primeira parte é de extrema importância e tem grande destaque nas três normas técnicas, ocupando grande parte das exigências necessárias, uma vez que a correta escolha da área pode representar o sucesso ou fracasso do projeto.

Ainda na questão da escolha da área, se faz necessário realizar estudos técnicos buscando informações sobre a área com o objetivo de caracterizar vários aspectos necessários no desenvolvimento de um projeto de aterro sanitário, porém sem se limitar apenas à área em questão, mas também considerando a área do entorno.

Para a avaliação da adequabilidade da área aos critérios de projetos exigidos pelas normas técnicas, as seguintes caracterizações devem ser elaboradas:

- a. Caracterização topográfica: Levantamento planialtimétrico da área com o auxílio de instrumentos topográficos;
- b. Caracterização geológica e geotécnica: Visando avaliar os riscos de poluição das águas, as condições de estabilidade e a capacidade suporte do solo, sendo esta realizada através de técnicas de sondagem de solos e complementados com ensaios de permeabilidade;

- c. Caracterização climatológica: Com base em informações disponíveis de estações meteorológicas próximas ou dados disponibilizados por instituições especializadas em meteorologia, devem ser considerados os dados de precipitação, temperatura, umidade relativa do ar, evapotranspiração e direção predominante dos ventos;
- d. Caracterização da área e da vizinhança: Investigação sobre os tipos de solos e uso dos corpos d'água, além de distâncias até os núcleos populacionais que devem ser maiores do que 500 m;
- e. Informações sobre jazidas de solos que poderão ser utilizadas nas rotinas operacionais dos aterros sanitários (ABNT, 2010).

Outro fator importante é a questão da vida útil do aterro sanitário. Recomenda-se que a capacidade volumétrica para aterramento de resíduos deve ser o bastante para a operação do aterro sanitário por no mínimo 10 anos (ABNT, 1997).

Importante que de todos os fatores abordados, são considerados como pontos a serem avaliados para a correta adequabilidade do local à implantação do aterro sanitário, no entanto, quatro pontos são considerados obrigatórios e devem ser observados. São eles:

- a. O aterro não poderá ser implantado em locais sujeitos a inundações, em períodos de recorrência de 100 anos;
- b. A distância entre a superfície do solo e o nível do lençol freático, a qual deve ser medida em épocas de maiores pluviosidades, deve ser de no mínimo 1,50 m, ou seja, deve haver uma camada de 1,50 m de solo entre o lençol freático e a superfície do solo;
- c. O solo do local que irá ser utilizado na implantação do aterro sanitário deve ter um coeficiente de permeabilidade de no mínimo 10^{-5} cm/s;
- d. Os aterros sanitários devem ser implantados apenas em locais permitidos pela legislação de uso e ocupação do solo (ABNT, 1997).

De acordo com Tchobanoglous *et al.* (2002) a seleção final de uma área para a implantação de um aterro sanitário é baseada no resultado de um estudo detalhado do local, projeto de engenharia e estudo de viabilidade financeira, além da condução de estudos sobre o impacto ambiental e audiências públicas. O autor ainda estabelece alguns fatores que devem ser consideradas na análise de potenciais locais para a implantação de aterros sanitários, os quais apresentam similaridades com as normas técnicas brasileira, como:

- a. Distância de transporte do local de coleta até a disposição final;
- b. Restrições locacionais;

- c. Disponibilidade total de área para a implantação do aterro sanitário;
- d. Facilidade de acesso ao local;
- e. Condições topográficas e pedológicas;
- f. Condições climáticas;
- g. Geologia e hidrogeologia, assim como hidrologia;
- h. Uso e ocupação do solo atual da área;
- i. Condições ambientais locais;
- j. Possibilidades de utilização da área após o encerramento.

Um fator importante para a implantação de aterros sanitários é a questão do uso futuro da área, o qual é um dos itens que as normas técnicas brasileiras, assim como Tchobanoglous *et al.* (2002) abordam. Os órgãos ambientais que licenciam este tipo de atividade, geralmente, solicitam que na documentação técnica elaborada, seja incluído um estudo sobre o potencial de utilização da área após o encerramento das atividades de disposição final de resíduos sólidos, conforme presente no artigo quarto da Resolução N° 308 (CONAMA, 2002).

2.3.1 Sistema de Impermeabilização

A ABNT (1997) estabelece que, quando as condições hidrogeologias do local forem desfavoráveis, deve ser implantada uma camada impermeabilizante da superfície inferior, construída com materiais de propriedades químicas compatíveis com o resíduo, ser colocada sobre uma base ou fundação capaz de suportá-la, bem como resistir aos gradientes de pressão acima e abaixo da impermeabilização, ser instalada de forma a cobrir toda a área, de modo que o resíduo ou o líquido percolado não entre em contato com o solo natural.

A impermeabilização da base deve ser realizada de forma a evitar que contaminação gerada pela disposição de resíduos seja minimizada, utilizando uma série de barreiras físicas de materiais sintéticos e naturais, dentre eles geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD), solo com baixo coeficiente de permeabilidade, dentre outros.

Os projetos compostos por geomembrana e solo predominantemente argiloso fornecem mais proteção e são hidraulicamente mais eficazes do que qualquer outro tipo de projeto, que utilize apenas uma das camadas (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2002).

O emprego de variados tipos de materiais para compor a impermeabilização é utilizado como medida de segurança, quando se espera que caso ocorra algum tipo de falha nas camadas superiores, as inferiores conseguiram conter a contaminação. Na Figura 6 estão alguns esquemas de impermeabilização de base em aterros sanitários.

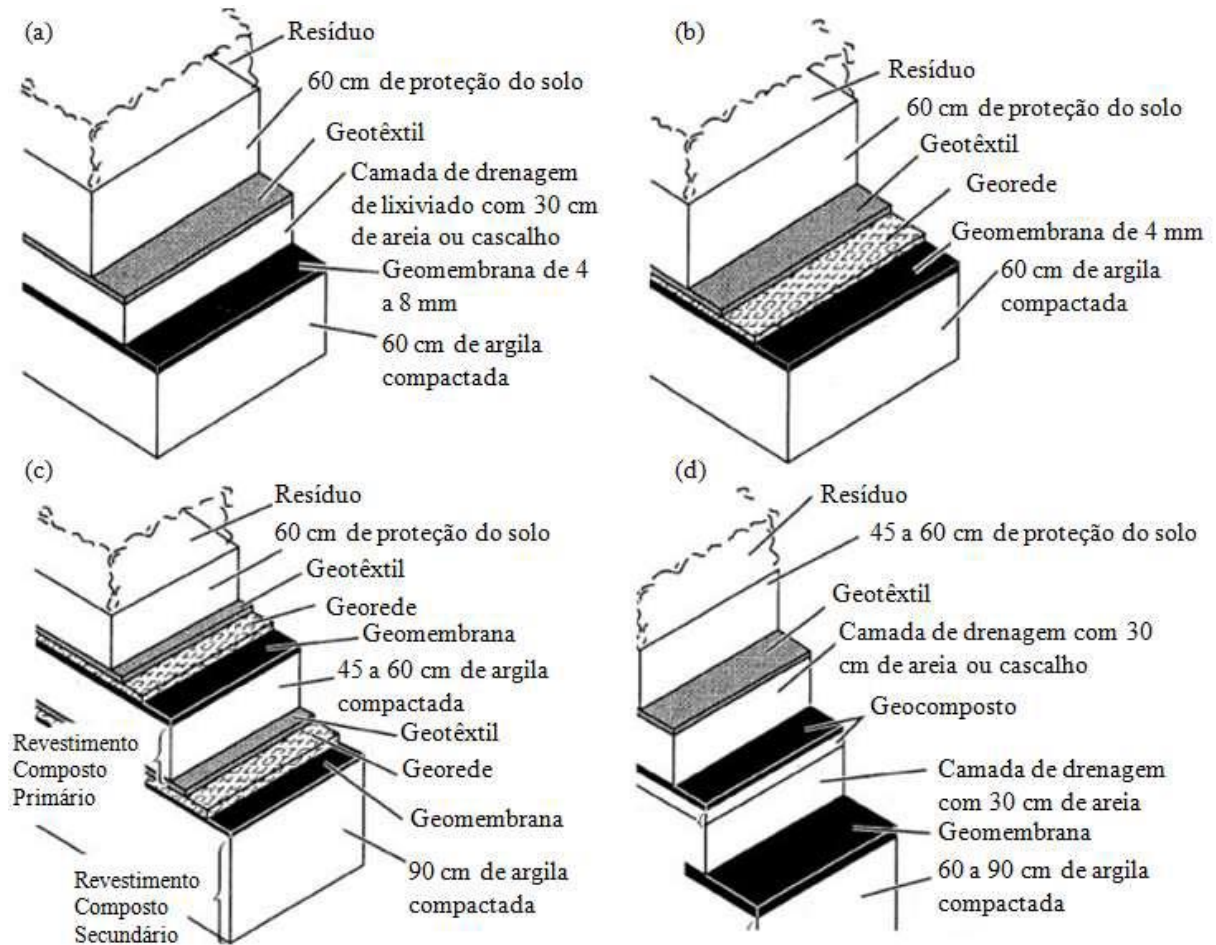


Figura 6 - Configurações de impermeabilização de base em um aterro sanitário. Fonte: Ribeiro, 2016.

Nos dois primeiros modelos apresentados na Figura 6, tanto em (a) quanto em (b), se optou por utilizar apenas uma camada de geomembrana, logo acima da base preparada com uma camada de argila compactada. Já nos modelos (c) e (d), foi adotado um modelo de camada dupla de impermeabilização por geomembrana. A geomembrana mais inferior funciona como uma segunda barreira, caso a geomembrana superior apresente algum vazamento. Em todos os casos, o geotêxtil é adotado com objetivo de impedir que o solo acima dele fique em contato direto com o meio drenante abaixo e cause carreamento de partículas deste solo. A camada de proteção logo acima do geotêxtil mais superior tem como objetivo impedir que danos sejam causados na geomembrana devido o tráfego de veículos e máquinas pesadas, assim como materiais e resíduos pontiagudos.

2.3.2 Sistema de Drenagem de Biogás e Lixiviados

O sistema de drenagem de biogás e lixiviados começa a ser implantado num aterro sanitário enquanto este não está em operação, partindo de sua base já impermeabilizada pelo método construtivo adotado em projeto, considerando ainda que a geomembrana utilizada na impermeabilização da área, desempenha papel importante na drenagem de lixiviados.

Ainda que sejam dois efluentes gerados pela atividade e em estados diferentes, o sistema de drenagem é unificado e se encarrega de coletar e encaminhar ambos para fora do maciço de resíduos para processos de tratamento.

Segundo a ABNT (1997) o sistema de drenagem deve ser instalado imediatamente acima da impermeabilização, dimensionado de forma a evitar a formação de uma lâmina de líquido percolado superior a 30 cm sobre a impermeabilização, construído com material quimicamente resistente ao resíduo e ao líquido percolado, ser suficientemente resistente a pressões originárias da estrutura total do aterro e dos equipamentos utilizados em sua operação, projetado e operado de forma a não sofrer obstruções durante o período de vida útil e pós-fechamento do aterro.

O sistema de drenagem pode adotar diferentes configurações, sendo as mais comuns a espinha-de-peixe e colchão drenante. No entanto, outros tipos de configurações (Figura 7) são adotados considerando as necessidades do projeto, disponibilidade financeira e características locais. Na Figura 7 (a) é utilizado apenas a base com inclinação em direção ao ponto de retirada do lixiviado, sem a adição de drenos para coleta. Na Figura 7 (b) é utilizado um dreno principal central, sendo este o responsável pela coleta e transporte do lixiviado para o ponto de retirado do lixiviado. Nesse caso a inclinação na base é direcionada perpendicularmente ao dreno principal. Na Figura 7 (c) é a configuração conhecida como espinha-de-peixe, onde são utilizados drenos secundários para interceptar o lixiviado e o encaminhar para o dreno principal. Os drenos secundários são instalados perpendicular ao fluxo do lixiviado e em comparação com o dreno principal, geralmente possuem dimensões menores. Na Figura 7 (d) é o sistema que utiliza drenos paralelos.

No caso do leito drenante, a configuração seria igual ao da Figura 7 (a), porém utilizando agregados graúdos dispostos em toda a base, criando uma área com maior quantidade de vazios, promovendo melhor drenagem de lixiviados.

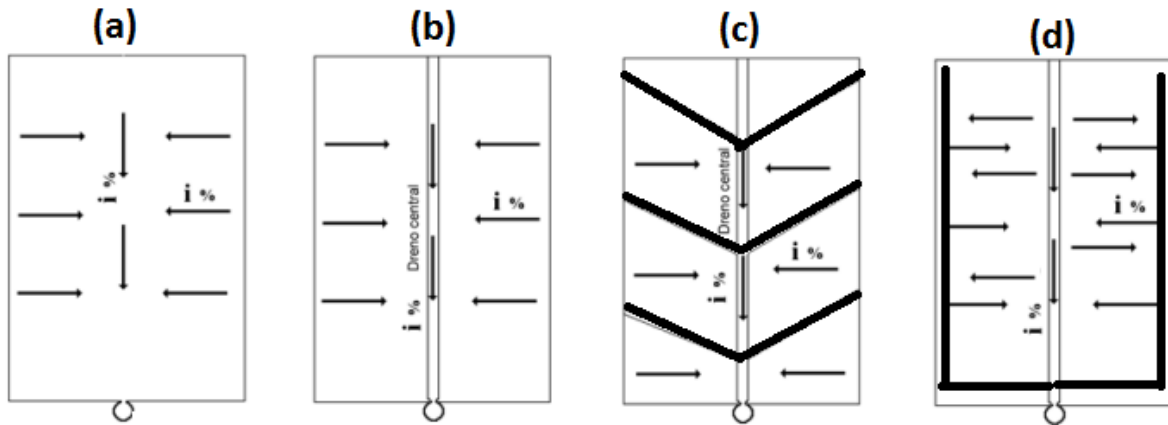


Figura 7 - Tipos de configuração do sistema de drenagem de base. Fonte: Adaptado de Neto, 2005.

A construção dos drenos que compõem o sistema segue métodos construtivos já consagrados em obras de drenagem de áreas ou ainda de estradas, sendo utilizados drenos com tubulação (Figura 8) ou drenos cegos (Figura 9), respectivamente, mais utilizados nos drenos principais e nos secundários. Para a construção são utilizados tubos de PEAD, material drenante como agregados e também geotêxtil não tecido (Bidim). Dependendo do projeto, podem ser utilizados os drenos cegos que são construídos de forma igual, porém sem a utilização de tubulação (Hamada *et al.*, 2012).

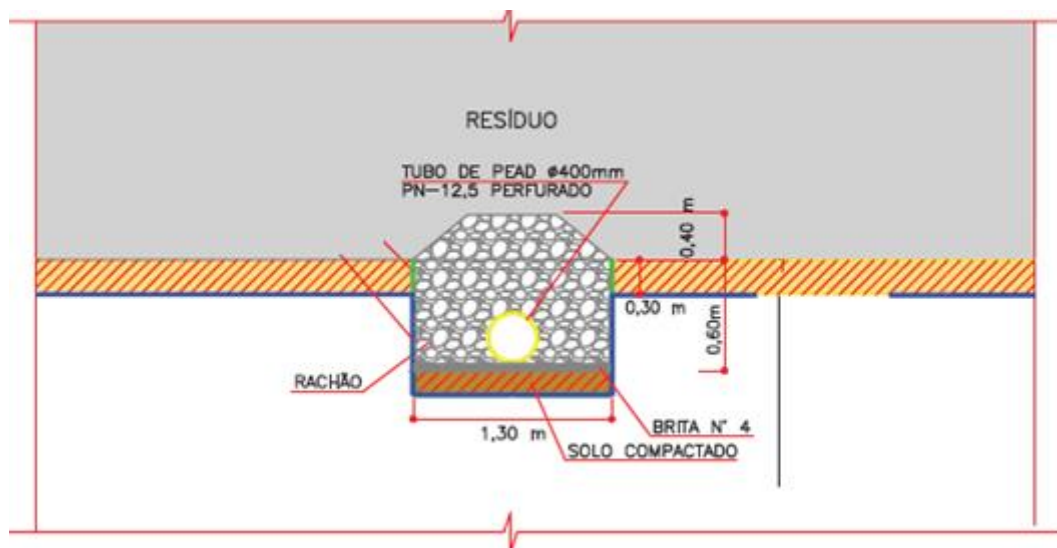


Figura 8 - Esquema típico de um dreno com tubulação. Fonte: Autor.

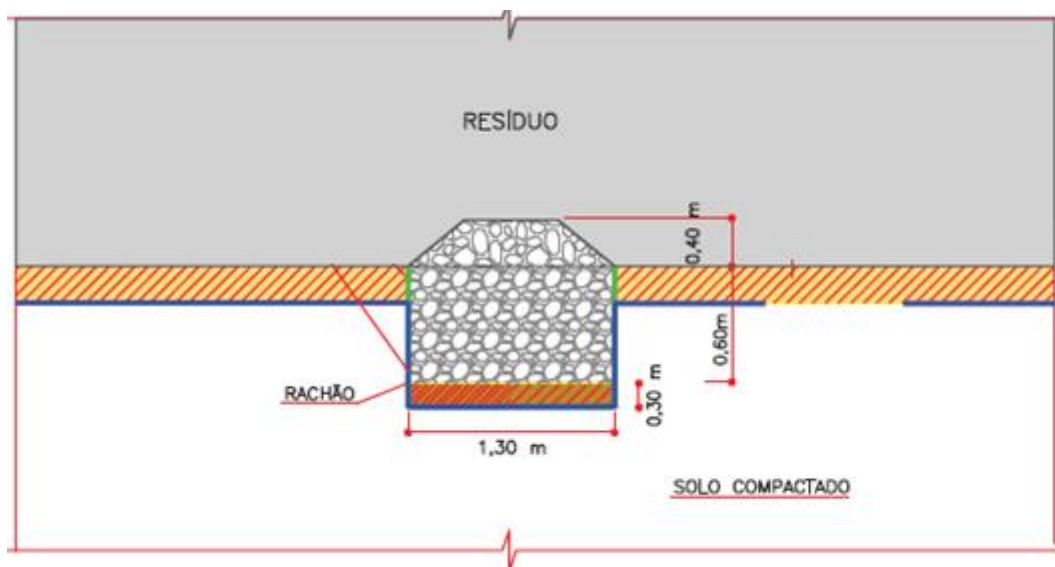


Figura 9 - Esquema típico de um dreno cego. Fonte: Autor.

O sistema de drenagem de emissões gasosas é composto por drenos verticais, que atravessam todo o aterro sanitário (Figura 10), desde o sistema de impermeabilização até acima do topo da camada de cobertura. Para dimensionar os drenos verticais utilizam-se equações de fluxo de fluidos (neste caso um gás) em meios porosos ou em tubulações ou adota-se um dimensionamento empírico do sistema vertical de drenos (HAMADA *et al.*, 2012).

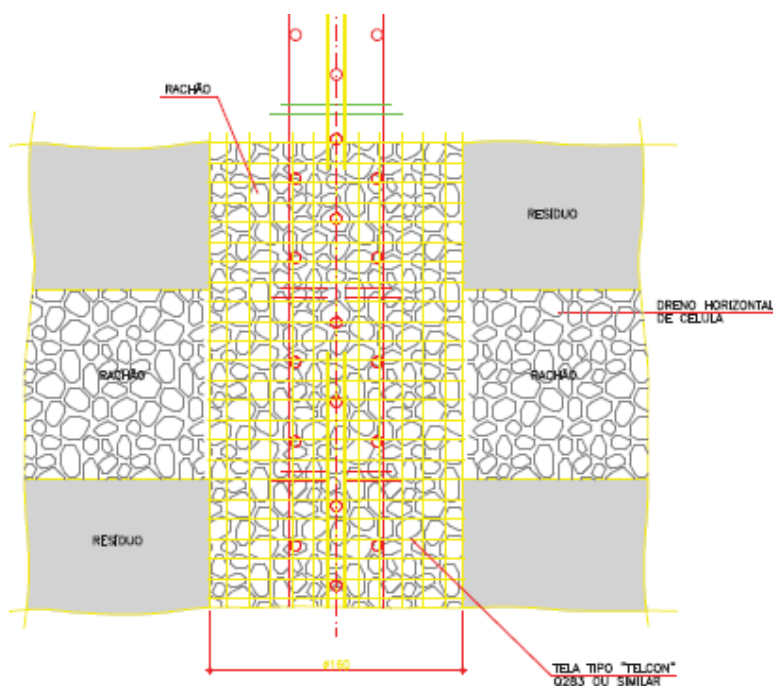


Figura 10 - Esquema típico de um dreno vertical. Fonte: Autor.

De acordo com Pereira (2005), de maneira geral, esses drenos verticais são construídos com tubos de concreto, brita nº 4 e tubos aramados de até 1,00 m de diâmetro. O diâmetro do dreno de gás varia de acordo com o porte do aterro sanitário, sua altura e a vazão de gás a ser drenada.

2.3.3 Sistema de Cobertura de Resíduos

A cobertura dos resíduos tem como um de suas principais funções minimizar a infiltração de água no maciço de resíduos, o que acarreta também na diminuição da geração de lixiviados. No entanto, outras funções também são desempenhadas pela cobertura realizada nos resíduos, como descrito por Catapreta (2008), como minimizar a migração de gases para fora do aterro sanitário, servir como elemento de redução de odor, vetores e outros inconvenientes, servir como sistema de controle de águas superficiais e facilitar a recomposição da paisagem.

A ABNT (1997) estabelece que o projeto e construção da cobertura final, de forma a minimizar a infiltração de água na célula, deve exigir pouca manutenção, não estar sujeita a erosão, acomodar assentamento sem fratura e possuir um coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da área do aterro. Dessa forma, garantir-se-á segurança e qualidade ambiental tanto na etapa operacional quanto no pós-encerramento.

A cobertura dos resíduos é identificada de acordo com a etapa de operação do aterro sanitário, sendo elas a cobertura diária, intermediária e final. A cobertura diária é aquela realizada diariamente após o encerramento da operação onde são utilizados comumente solos, lonas de caminhão, geomembranas de sacrifício ou materiais inertes como agregados de demolição e construção civil.

A intermediária é utilizada para áreas onde não serão realizadas operações por um longo período, podendo ser de um ano ou mais, e sem poder ser finalizada, ou seja, em algum momento a operação irá voltar para este local e serão dispostos mais resíduos.

A cobertura final é para quando o aterro sanitário teve sua vida útil ou capacidade esgotada, finalizando as operações no local e sendo um tratamento para o pós-encerramento e recomposição da área. Quando são utilizados solos na cobertura diária e intermediária, comumente é realizada a retirada ou raspagem deste material antes da disposição de resíduos, evitando a criação de uma camada de menor permeabilidade no maciço e também promover a conjugação entre todos os resíduos dispostos, facilitando a percolação dos líquidos e gases.

Enquanto comumente são divididas em três etapas de recobrimento de resíduos, principalmente por operadores brasileiros, Tchobanoglous *et al.* (2002) divide apenas em

intermediária e final. Ele elenca alguns materiais utilizados em coberturas intermediárias, como solos, compostos de resíduos orgânicos, geomembranas e resíduos de construção civil. No entanto, os solos e geomembranas tem a maior eficiência para evitar a entrada de águas no maciço.

Em todos os casos, a camada de cobertura deve ser pensada considerando diversos fatores, incluindo disponibilidade de material, os custos de aquisição e a finalidade. A camada final é realizada de acordo com os projetistas e operadores, sendo extremamente variável a composição dela. Tipicamente, a cobertura final tem uma configuração próxima do esquema apresentado na Figura 11.

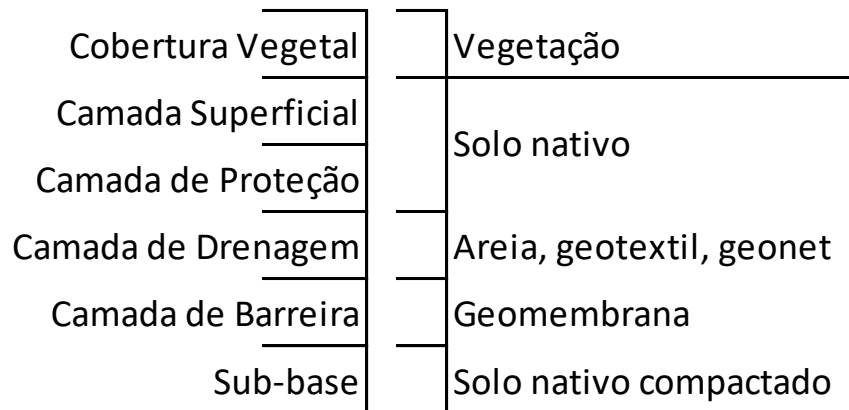


Figura 11 - Configuração típica de uma camada final de cobertura. Fonte: Autor.

Na utilização de solos para a cobertura do maciço de resíduos, a importância da utilização de um solo com baixo coeficiente de permeabilidade se dá pelo fato de que solos mais permeáveis permitem maior infiltração de água no maciço de resíduos, contribuindo com maior geração de lixiviados. A variação do coeficiente de permeabilidade (k) encontrados comumente em solos está apresentada na Figura 12.

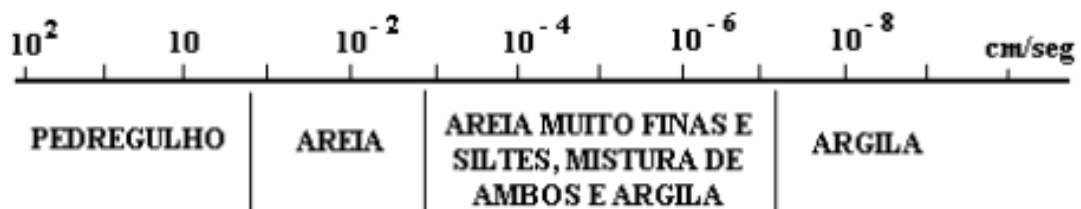


Figura 12 – Valores de coeficiente de permeabilidade. Fonte: A. Casagrande e R. E. Fadum (1940).

2.3.4 Sistema de Drenagem Superficial

A implantação de um sistema de drenagem superficial de águas é de grande importância em um aterro sanitário para evitar a entrada de águas no maciço de resíduos, o que diminui a geração de lixiviados e disciplina o escoamento superficial das águas.

A ABNT (1992) estabelece que deva ser previsto sistema de drenagem das águas superficiais que tendam a escoar para a área do aterro sanitário, bem como das águas que se precipitam diretamente sobre essa área. O responsável pelo aterro deve projetar, construir, operar e manter um sistema de desvio de águas superficiais da área do aterro capaz de suportar uma chuva de pico de cinco anos. (ABNT, 1997). As normas técnicas recomendam ainda a constante vistoria e manutenção dos dispositivos para garantir seu correto funcionamento.

O sistema de drenagem superficial é composto por calhas, drenos e descidas d'água que são responsáveis por coletar e encaminhar as águas pluviais para um ponto de descarga, implantados tanto na área que o aterro sanitário está inserido evitando que as águas sejam escoadas em direção a ele, assim como no próprio maciço, encaminhando as águas que não tenham entrado em contato com os resíduos para fora.

Ribeiro (2016) diz que para garantir um bom dimensionamento do sistema de drenagem devem ser considerados as condições geológicas, hidrogeológicas e climáticas do local, o projeto geométrico do aterro sanitário e seu plano operacional. É necessário definir as inclinações/caimentos das plataformas de operação, as canaletas das bermas definitivas e os dispositivos de dissipação de energia das escadas d'água, para viabilizar a condução das águas pluviais (IKEGUCHI, 1994). É importante utilizar dispositivos flexíveis, devido às grandes deformações que os aterros sanitários apresentam ao longo do tempo (NUCASE, 2008).

Devido às características da atividade, não é incomum observar nos aterros sanitários em operação, a utilização de componentes do sistema de drenagem superficial (como calhas de concreto) implantados de forma temporária em áreas que ainda receberão resíduos, a qual garante flexibilidade ao operador de retirar estes componentes e reutilizá-los.

2.4 Metodologia de Estimativa de Geração de Lixiviados

O cálculo de estimativa de geração de lixiviados em um aterro sanitário é um fator de grande importância, pois deve ser considerado tanto na etapa de projeto quanto na etapa de operação, inclusive para a escolha e rotas tecnológicas a serem adotadas no tratamento do mesmo, seja para tratamento *onsite* ou *offsite*.

A estimativa da geração de lixiviados contribui no dimensionamento do sistema de drenagem, uma vez que as seções dos drenos são calculadas com base numa vazão esperada, e ainda fornece dados sobre a necessidade de se ter lagoas para armazenamento, seu volume e ainda a vazão esperada a ser tratada numa estação de tratamento.

Um dos principais problemas operacionais em aterros sanitários no Brasil atualmente é o tratamento do lixiviado, pois é um líquido complexo de ser tratado devido sua composição, variabilidade e fatores que influem na composição do lixiviado.

Dominoni (2020) apresenta os principais fatores que influenciam na geração de lixiviados em um aterro sanitário (Tabela 7).

Tabela 7 - Relação dos fatores que influenciam na produção de lixiviado. Fonte: Adaptado de Dominoni (2020).

Fatores de influência na geração de lixiviados		Relação
Disponibilidade Hídrica	Precipitação	Aumento
	Escoamento Superficial	Redução
	Evapotranspiração	Redução
	Umidade natural dos resíduos	Aumento
	Retenção de água na camada de cobertura	Redução
Estágio de Degradação dos Resíduos		Aumento, até o terceiro ano do resíduo aterrado
Volume de Resíduos		Aumento
Compactação dos Resíduos		Redução

Os métodos mais utilizados para realização desta estimativa são os mesmos utilizados geralmente em obras hidráulicas, como por exemplo, em barragens e hidroelétricas, onde se deseja saber de acordo com a precipitação, qual a vazão que uma determinada bacia hidrográfica gera. Para o caso de aterros sanitários, esses modelos acabam, em alguns casos, não incluindo fatores importantes como a umidade inerentes dos resíduos sólidos urbanas no Brasil.

Em comparação desses três métodos de estimativa de vazão de lixiviados, sendo eles o Método Suíço e o de Balanço Hídrico, Dominoni (2020) apresentou que dos fatores elencados na Tabela 8, todos os métodos consideram a precipitação. O método de Balanço Hídrico considera escoamento superficial, evapotranspiração, retenção de água na camada de cobertura e a umidade natural, já a compactação de resíduos é utilizada apenas no Método Suíço.

Tabela 8 - Fatores utilizados no cálculo de cada um dos métodos de estimativa de geração de lixiviados. Fonte:
Adaptado de Dominoni (2020).

Fatores de Influência	Balço Hídrico	Método Suíço
Precipitação	✓	✓
Escoamento Superficial	✓	-
Evapotranspiração	✓	-
Umidade natural dos resíduos	✓	-
Compactação dos resíduos	-	✓
Retenção de água na cobertura	✓	-

3. METODOLOGIA

A pesquisa abordou questões técnicas sobre a operação dos aterros sanitários e foi aprofundada nos aspectos relacionados ao sistema de drenagem de lixiviados, utilizando dados disponibilizados por empresas privadas que operam seis aterros sanitários nos estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais.

Devido à exigência das empresas, não serão identificados os aterros sanitários nem as empresas responsáveis pela operação devido à sensibilidade das informações. No entanto, quando autorizado, foi realizado registro fotográfico das visitas técnicas e adicionadas ao trabalho.

O trabalho foi desenvolvido realizando visitas técnicas acompanhadas dos responsáveis pelos aterros sanitários com o auxílio de um roteiro estruturado para levantamento de dados. Também foram utilizadas informações técnicas sobre os projetos dos aterros sanitários e desenhos técnicos.

3.1 Escolha dos Locais

Os aterros sanitários que são objetos da pesquisa foram escolhidos com base em informações preliminares (tempo de funcionamento, tipo e porte do aterro sanitário, tipo de sistema de drenagem de lixiviados e localização) acerca de como foram implantados os sistemas de drenagem de gases e de lixiviados, assim como pelo seu porte, buscando uma diversidade e pluralidade de informações, trazendo a maior quantidade de informações diferentes umas das outras.

Todos os seis aterros sanitários são operados por empresas privadas com conhecimento técnico comprovado da atividade, sendo eles de médio a grande porte, licenciados para operação pelos órgãos ambientais de fiscalização e controle, sendo cinco deles localizados no estado do Rio de Janeiro e um em Minas Gerais.

Os aterros sanitários recebem principalmente resíduos gerados pelos municípios das cidades próximas a eles. No entanto, os de maior porte abrangem uma área de atendimento maior do que apenas os municípios fronteiriços.

Ainda que os aterros sanitários sejam de portes diferentes, é possível realizar, de forma qualitativa, a análise e comparação da implantação e operação.

3.2 Roteiro Estruturado

O roteiro estruturado foi elaborado a partir da análise de trabalhos e normas técnicas, contando também com a colaboração de um especialista, o Prof. Dr. João Alberto Ferreira, para definição dos aspectos que seriam observados nas visitas técnicas e dados que foram solicitados aos responsáveis das empresas para melhor entendimento da pesquisa.

Este foi dividido em sete seções, como apresentado na Tabela 9, sendo elas:

- 1) Informações Preliminares: dados de projeto e de operação em relação ao tipo de resíduo, quantidade recebida, vida útil e método construtivo;
- 2) Monitoramento Operacional: Informações sobre como a operação de espalhamento e compactação dos resíduos é executada, assim como dados de controle geotécnico e de geração de lixiviados;
- 3) Sistema de Recobrimento de Resíduos: como e se são realizados os recobrimentos dos resíduos conforme normativo técnico, utilizando cobertura diária, intermediária e final, assim como quais materiais são empregados;
- 4) Sistema de Drenagem de Águas Pluviais: dados sobre como os operadores realizam a implantação e manutenção da drenagem de águas superficiais e quais materiais são utilizados;
- 5) Sistema de Drenagem de Lixiviados na Base e entre Camadas: dados tanto de projeto quanto de execução e operação;
- 6) Sistema de Drenagem de Lixiviados entre Camadas: assim como o item anterior;
- 7) Ações Emergenciais: incorrências observadas no aterro sanitário relacionadas ao sistema de drenagem de lixiviados, assim como as rotinas operacionais em épocas de chuvas.

Tabela 9 - Roteiro estruturado para as visitas técnicas. Fonte: Autor.

1. INFORMAÇÕES PRELIMINARES	
1.1	Classificação dos Resíduos
1.2	Quantidade média de resíduos (t/mês)
1.3	Controle de peso por balança rodoviária
1.4	Tempo desde o início da operação (anos)
1.5	Vida útil projetada (anos)
1.6	Vida útil atual (anos)
1.7	Quantidades de células de disposição de resíduos
1.8	Área ocupada pelas células (m ²)
1.9	Tipo de aterro (encosta, vala, área)
1.10	Espessura das camadas de resíduos (m)
1.11	Quantidade de camadas projetada
1.12	Quantidade de camadas atual

2. MONITORAMENTO OPERACIONAL	
2.1	Controle de inclinação e passadas dos equipamentos
2.2	Controle de Massa Específica dos Resíduos Aterrados
2.3	Massa Específica Projetada (toneladas/m ³)
2.4	Vazão de lixiviados (m ³ /dia)
2.5	Tipo de tratamento de lixiviados
2.6	Dados de pluviosidade (mm/ano)

3. SISTEMA DE RECOBRIMENTO DE RESÍDUOS	
3.1	Material utilizado
3.2	Realiza Cobertura diária/provisória
3.3	Remoção da Cobertura ao início do turno de trabalho
3.4	Realização da Cobertura intermediária
3.5	Remoção da Cobertura Intermediária
3.6	Controle e espessura da camada de cobertura
3.7	Configuração da Cobertura final

4. SISTEMA DE DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS	
4.1	Material utilizado
4.2	Drenagem temporária
4.3	Drenagem definitiva

5. SISTEMA DE DRENAGEM DE LIXIVIADOS NA BASE	
5.1	Tipo de sistema implantado
5.2	Método de construção
5.3	Drenos escavados ou acima da camada de impermeabilização
5.4	Possibilidade de manutenção e desobstrução
5.5	Material utilizado
5.6	Métodos de Controle da altura de lixiviados
5.7	Croqui esquemático
5.8	Estimativa de custos de implantação
5.9	Possui piezômetros
5.10	Dados de monitoramento da lâmina de lixiviados

6. SISTEMA DE DRENAGEM DE LIXIVIADOS ENTRE CAMADAS	
6.1	Implantado ou não
6.2	Tipo de sistema implantado
6.3	Método de construção
6.4	Material utilizado
6.5	Utiliza dreno de pé de talude
6.6	Croqui esquemático
6.7	Estimativa de custos de implantação

7. AÇÕES EMERGENCIAS	
7.1	Ações para Solução de Afloramentos de lixiviados
7.2	Operação em dias de chuva

3.3 Visitas Técnicas

As visitas técnicas foram realizadas ao longo do ano de 2021, com uma visita presencial realizada por local, e acompanhadas pelos responsáveis de cada empresa. Nestas visitas com o auxílio do roteiro estruturado, foram observados os pontos abordados neste trabalho e levantados dados para a análise dos aspectos de interesse.

O acompanhamento em campo das atividades e a observação permitiram um melhor entendimento da atividade, suas particularidades e semelhanças entre os seis locais pesquisados.

Os dados necessários quando não informados no momento da visita, foram posteriormente informados por meio eletrônico, assim como o envio de desenhos técnicos e fotos.

3.4 Análise de Dados

Os dados e informações obtidas nas visitas técnicas, foram analisados de forma a comparar qualitativa e quantitativamente, os seis locais pesquisados. A análise foi realizada com o intuito de entender melhor como esses seis aterros sanitários lidavam com questão que são comuns a todos, observando as suas particularidades e similaridades.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados obtidos com a aplicação do questionário nas visitas técnicas, assim como as observações realizadas em campo e os materiais disponibilizados pelos responsáveis dos locais pesquisados, serão apresentados e analisados, realizando ainda comentários com base em pesquisas bibliográficas.

4.1 Informações Preliminares

Os aterros sanitários no Brasil, ainda que pela Lei Federal 12.305 (BRASIL, 2010) sejam destinados a receberem rejeitos, são em sua grande maioria destinados a receber resíduos classe II. A Tabela 10 apresenta a classificação e a quantidade mensal de resíduos recebida. Em todos os casos os resíduos são pesados em balanças rodoviárias instaladas na recepção dos veículos.

Tabela 10 - Informações sobre classificação e quantidade de resíduos. Fonte: Autor.

Local	Classificação dos resíduos	t/mês
CTR-1	Classe II-A e II-B	11.000
CTR-2		5.000
CTR-3		10.000
CTR-4		15.000
CTR-5		120.000
CTR-6		24.000

Os aterros sanitários visitados apresentam vida útil de no mínimo 10 e máxima de 110 anos (conforme projeto e estimativas de recebimento de resíduos), com tempo de operação entre 4 a 19 anos, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Informações sobre a vida útil e tempo de operação. Fonte: Autor.

Local	Tempo desde o início da operação (anos)	Vida útil projetada (anos)	Vida útil atual (anos)
CTR-1	4	10	6
CTR-2	5	13	9
CTR-3	6	30	24
CTR-4	11	110	180
CTR-5	19	32	13
CTR-6	9	26	17

Outro fator importante é a área ocupada, topografia da região e o tipo, podendo ser em vala, encosta ou área, ou ainda uma mistura dos dois últimos. A Tabela 12 apresenta as características físicas dos aterros sanitários pesquisados.

Tabela 12 - Informações sobre as características físicas dos aterros sanitários. Fonte: Autor.

Local	Nº de células	Área de maciço (m²)	Tipo de aterro	Nº de camadas projetada e Altura	Nº de camadas atual e Altura
CTR-1	Uma célula implantada em etapas	46.000	Encosta dentro de um vale	11 – 55 m	6 – 30 m
CTR-2		40.000	Área e evoluindo para encosta	9 – 45 m	4 – 20 m
CTR-3		143.000		13 – 65 m	5 – 25 m
CTR-4		1.460.000	Área	12 – 60 m	6 – 30 m
CTR-5		450.000	Encosta	19 – 95 m	14 – 70 m
CTR-6		400.000		13 – 65 m	7 – 35 m

Em relação ao número de células, todos são implantados em etapas, ou seja, se divide o total de área que é prevista o aterro sanitário ocupar, por porções menores, diminuindo o custo inicial de implantação e também garantindo que os componentes de impermeabilização e de drenagem na base do aterro sanitário não sofram por intempéries.

Todos apresentam dimensões consideráveis de área e altura, sendo as camadas com 5 m de altura, variando de 45 até 95 m de altura total. Dependendo do controle operacional e do recobrimento dos resíduos, estas dimensões sugerem uma produção significativa de lixiviado. Ainda o fato de que, com exceção do CTR-4, todos os CTRs são ou serão do tipo encosta e a topografia local pode ajudar contribuindo com o escoamento superficial de águas pluviais em direção a área do maciço de resíduos.

Do ponto de vista de segurança estrutural e geotécnica, ter uma encosta de solo virgem preparada para ser utilizado como apoio lateral, colabora no aumento do fator de segurança, porém necessita de maior cuidado e necessidade de implantação de um robusto sistema de drenagem pluvial. Aterros sanitários com grandes alturas acabam por ter um maior tempo de percolação das águas pluviais desde o topo até sua base, onde de fato ocorre a retirada dos líquidos.

Ainda sobre a altura total dos aterros sanitários, Trapani *et al.* (2015) relacionou a altura alcançada, a formação de zonas impermeáveis, a umidade dos resíduos assim como o fluxo lateral do lixiviado, através de modelagem. Foi observado que quanto mais alto o aterro sanitário, maior o fluxo lateral de lixiviados, tendo sido estudado quatro cenários, variando a altura entre 15 a 35 m, como pode ser visto na Figura 13. Os dados apresentados mostram que no pior cenário onde o resíduo tem uma umidade alta e o aterro sanitário tem 35 m de altura, o acumulado de lixiviados que seguem o fluxo lateral ao invés do vertical, chega a 1.158 mm.

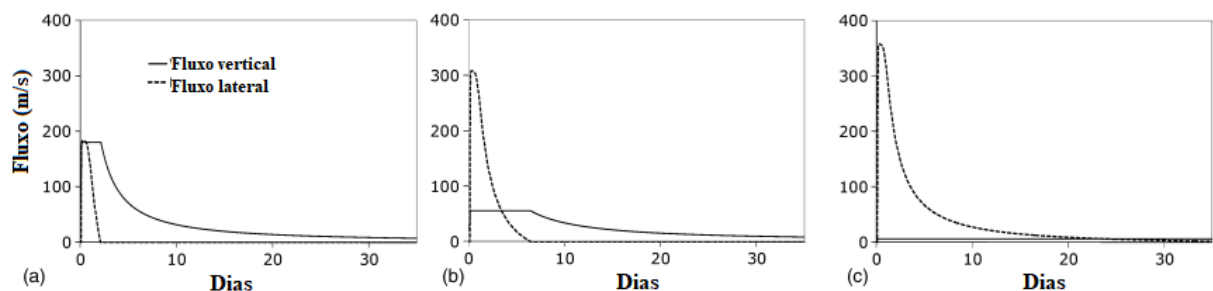


Figura 13 - Fluxo lateral e vertical de lixiviados considerando aterros sanitários com alturas iguais a: (a) 15 m, (b) 20 m e (c) 35 m. Fonte: Adaptado de Trapani *et al.* (2015).

Em todos os seis aterros sanitários deste estudo, as alturas são maiores do que 35 m, o que mostra a possibilidade de ocorrer grande quantidade de fluxo lateral de lixiviados, causando problemas operacionais como afloramentos em taludes e bermas.

Ademais, a criação de zonas impermeáveis se deve pela carga aplicada dos resíduos superpostos onde quanto maior a altura do maciço de resíduos (situação dos seis aterros

sanitários avaliadas), maior também a carga aplicada nas camadas mais inferiores, compactando cada vez mais as mesmas. Importante também é a gravimetria dos resíduos que influencia no quanto o maciço pode sofrer de recalque pela própria degradação da matéria orgânica e adensamento dos resíduos.

4.2 Monitoramento Operacional

O controle e monitoramento operacional da atividade de espalhamento e compactação dos resíduos é importante para garantir o melhor aproveitamento do volume útil do aterro sanitário, segurança geotécnica e melhor utilização dos equipamentos envolvidos, como os tratores e escavadeiras.

A Tabela 13 apresenta os dados sobre o controle operacional efetuado pelos aterros sanitários na atividade de espalhamento e compactação dos resíduos, onde em todos os casos o controle da inclinação da rampa de compactação, e também a quantidade de passadas que os tratores efetuam sobre os resíduos, são realizados de forma expedita pelos operadores destes equipamentos.

Tabela 13 – Verificação de massa específica. Fonte: Autor.

Local	Controle de inclinação e passadas dos equipamentos	Controle de massa específica dos resíduos aterrados	Massa Específica projetada (t/m ³)
CTR-1	Visualmente pelo operador e encarregados de operação	Efetuado pela topografia	1,00
CTR-2			1,00
CTR-3			1,00
CTR-4			1,10
CTR-5			1,05
CTR-6	6 passadas com o trator		0,70

Nos seis aterros sanitários se dá preferência para rampas com inclinação entre 30 a 40 graus e com os tratores trabalhando sempre no sentido “morro acima” ou “*uphill*”, sempre trabalhando carregando os resíduos da base até o seu topo, garantindo uma compactação mais

eficaz. Em outros momentos, quando necessário, o trator pode trabalhar no sentido “morro abaixo” ou ainda na horizontal, porém, segundo os operadores, a compactação é menor.

A inclinação da rampa é importante para garantir uma boa compactação dos resíduos. Se observa que quando os tratores estão efetuando a compactação em rampas com pouca inclinação, a massa específica diminui e se perde volume útil. Porém, com a inclinação adequada, a compactação é otimizada. Isso acontece devido a distribuição de peso do trator e seu centro de massa.

Para o controle de inclinação e passadas dos equipamentos, foi abordado nas visitas que a dificuldade de realizar este controle ocorre principalmente por conta do volume de resíduos recebidos em um curto período de tempo e a necessidade de ter algum colaborador observando e controlando todo o processo. Assim, para dar conta do volume e ter esse controle, seria necessário aumentar a quantidade de equipamentos disponíveis e um colaborador dedicado a isso, gerando custos para o aterro sanitário.

Em todos os seis aterros sanitários os responsáveis se utilizam da experiência dos operadores dos equipamentos assim como o acompanhamento do encarregado de operação, que é responsável por controlar as ações realizadas no aterro sanitário.

A massa específica projetada é a que se espera alcançar na operação dos aterros sanitários. Esse controle é realizado confrontando a pesagem realizada pela balança em um determinado período de tempo com o controle topográfico de volume ocupado. No caso dos CTR-1, 2 e 3, este controle é realizado mensalmente, enquanto nos outros três é realizado quinzenalmente.

O processo de espalhamento e compactação está diretamente relacionado aos valores de projeto e operação de massa específica dos resíduos. Em projeto, como no caso do CTR-6, o valor de $0,70 \text{ t/m}^3$, em comparação aos outros que são todos iguais ou superiores a $1,00 \text{ t/m}^3$, é considerado baixo para garantir um melhor aproveitamento volumétrico.

Como apresentado na Tabela 5, é comum achar valores até $1,70 \text{ t/m}^3$, que pode significar que os resíduos já passaram por vários processos de adensamento assim como também pode ser resultado de uma operação adequada.

Dos seis locais pesquisados, todos afirmaram que o monitoramento da massa específica é realizado pela equipe de topografia, levantando o volume ocupado e o comparando com a pesagem da balança rodoviária. Ainda afirmaram que os valores desse monitoramento são superiores aos valores de projeto. Sendo assim, eles conseguem garantir um melhor aproveitamento de volume do aterro sanitário, estendendo a sua vida útil. Pode também ser

entendido que a operação destes aterros sanitários, em relação ao recebimento, espalhamento e compactação dos resíduos está ocorrendo de forma correta.

A Figura 14 apresenta uma frente operacional típica de aterros sanitários, onde é possível observar os resíduos, destacados no círculo branco, que estão aguardando para serem espalhados, e mais à esquerda, sendo compactados pelo trator. As linhas em vermelho mostram a base e o topo da rampa de inclinação, com o trator trabalhando no sentido morro acima. Pode-se destacar também a presença da drenagem vertical composta por tela metálica que age como estrutura de contenção e organização, tubulação PEAD e pedra rachão, formando o dreno vertical de gases e lixiviados.



Figura 14 - Frente operacional de descarga e compactação dos resíduos. As linhas vermelhas destacam o início e o final da rampa. O círculo branco destaca os resíduos aguardando serem espalhados e compactados. Os tubos em PEAD estão envoltos por pedra rachão e tela metálica (destacada em laranja). Fonte: Autor.

Ainda sobre a frente operacional, outro fator importante é a dimensão adotada para evitar que não se tenha uma área muito grande exposta, principalmente em períodos de chuva, o que colabora com a diminuição da geração de lixiviados assim como controle de vetores como fauna sinantrópica (urubus, garças, ratos, baratas, dentre outros). Em todos os casos, a frente operacional é mantida com dimensões que comportem o volume de pico de veículos transportadores de resíduos.

Considerando a gravimetria dos resíduos que são dispostos nos aterros sanitários, como visto, por exemplo no estudo da COMLURB, existe uma grande parcela de plásticos (filme,

PET, duros, dentre outros). O sentido do fluxo preferencial do lixiviado no maciço de resíduos é vertical, porém ao encontrar barreiras, ele acaba mudando este sentido e buscando outros caminhos. No caso dos plásticos e outros resíduos sólidos que possam formar barreiras físicas, estes funcionam como um condutor para a mudança de sentido e direção do fluxo.

Na Figura 15 é possível observar como os resíduos ficam após o trabalho de espalhamento e compactação, tendo sido registrado o momento em que uma camada de resíduos já finalizada é trabalhada para inclusão de nova linha de drenagem de lixiviados, realizando a escavação de uma vala para posteriormente adicionar o meio drenante.

No momento deste registro foi possível observar como em grande parte o lixiviado escoar e segue o fluxo ditado pelos plásticos e outros resíduos que criam barreiras para o seu fluxo natural. Nesta mesma figura é possível observar o efeito de “fibras” criado pelos resíduos plásticos tipo filme, os quais conferem resistência ao maciço de resíduos.



Figura 15 - Escavação de vala para a implantação de drenagem de lixiviados (à esquerda da foto) e na direita os resíduos que foram retirados para abertura da vala. Fonte: CTR.

Em estudo realizado por Borgatto *et al.* (2014) que aborda a influência de plásticos na estabilidade do maciço de aterros sanitários, conclui que estes são responsáveis por contribuir positivamente nas propriedades de forças de cisalhamento. Comparando RSU com e sem plásticos, foi possível observar uma redução de 17% no valor de coesão aparente.

Outro importante fator de monitoramento operacional é o controle da vazão de lixiviados e também da pluviosidade, o que permite entender melhor se a operação do aterro

sanitário está conseguindo evitar que grandes quantidades de águas pluviais infiltrem no maciço e por consequência, gerando mais lixiviados.

A Tabela 14 apresenta informações sobre a média diária de vazão de lixiviados assim como o somatório anual de pluviosidade. A vazão, a depender do local, é medida de forma empírica com o auxílio de um cronômetro e um recipiente de volume conhecido, anotando o tempo que leva para completar este volume. Em outros casos existem equipamentos de medição de vazão como calhas parshall.

Tabela 14 - Informações sobre pluviosidade e vazão média de lixiviados. Fonte: Autor.

Local	Vazão média de lixiviados (m³/dia)	Dados de pluviosidade (mm/ano)
CTR-1	60	1.400
CTR-2	20	1.600
CTR-3	70	1.600
CTR-4	120	1.700
CTR-5	600	1.800
CTR-6	120	1.900

Ao se comparar a quantidade de resíduos recebidos com a vazão de lixiviados, se verifica que são fatores dependentes. A Figura 16 indica que uma maior quantidade de resíduos gera maior quantidade de lixiviados. Se verifica ainda que os aterros com quantidades semelhantes de resíduos e precipitações, como por exemplo os CTR-1, 3 e 4, apresentam geração de lixiviados entre 60 a 120 m³/dia; provavelmente esta diferença é por conta da área ocupada por cada um dos aterros sanitários, onde áreas ocupadas maiores, tem maior contato com as águas pluviais.

No caso do CTR-2 e 3, que apresentam pluviosidade de 1.600 mm ao ano, a variação na geração de lixiviados acontece devido a quantidade média de resíduos que são recebidos nos aterros sanitários.

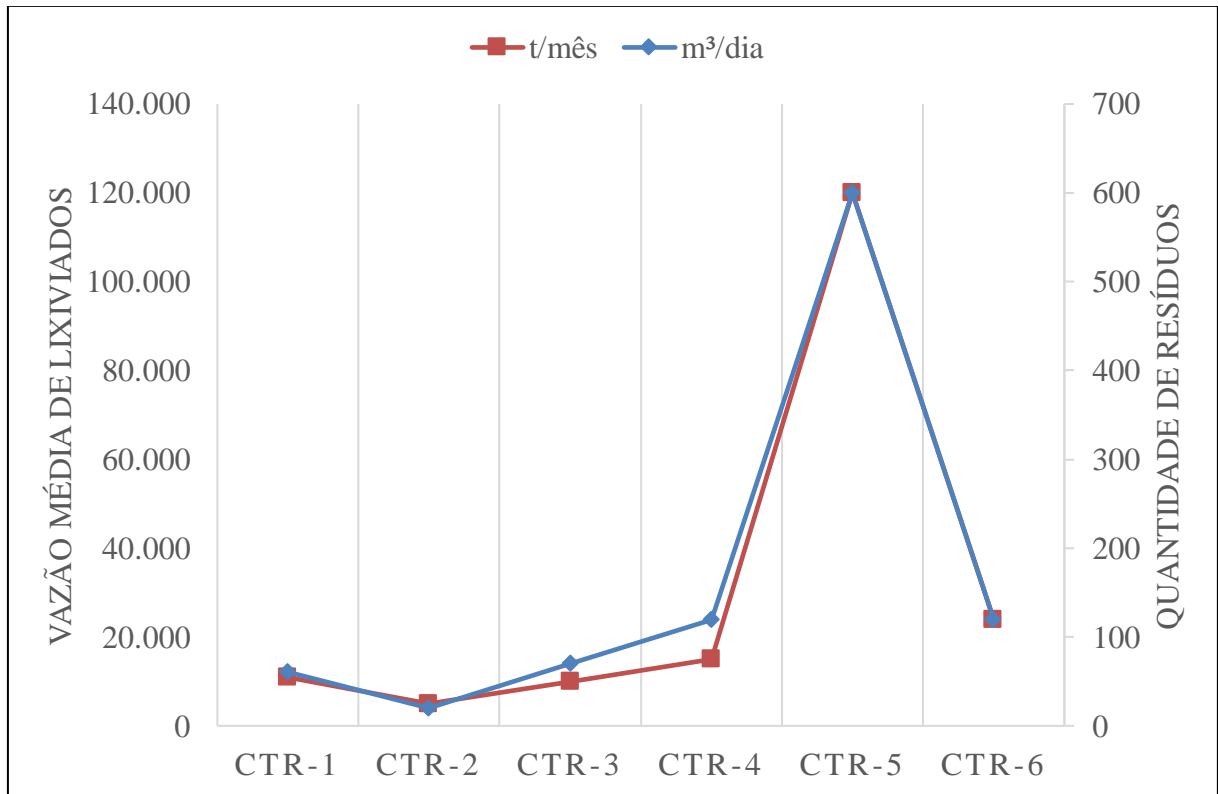


Figura 16 - Comparativo entre a quantidade de resíduos recebidos e a geração de lixiviados. Fonte: Autor.

Outro fator importante é a quantidade de águas pluviais que consegue infiltrar no maciço, seja pela frente operacional ou então falhas no recobrimento dos resíduos e sistema de drenagem pluvial. Os seis aterros sanitários apresentam pluviosidade com valores próximos à média histórica, medidos por pluviômetros instalados em suas áreas, ou dados de estação meteorológica próxima de sua região.

Todos CTRs possuem estação de tratamento de lixiviados em suas dependências, exceto o CTR-2 que contrata uma empresa terceirizada para a coleta, transporte e tratamento de seu lixiviado. A forma de tratamento utilizada nos outros cinco aterros sanitários é inicialmente o tratamento biológico com lagoas aeradas e/ou facultativas, tratamento físico-químico e polimento final do efluente por filtração com membranas.

4.3 Sistema de Recobrimento de Resíduos

O recobrimento dos resíduos é um importante fator em qualquer aterro sanitário e deve ser realizado conforme projeto para evitar problemas relacionados ao balanço hídrico assim como controlar possíveis impactos ambientais. Para tanto, é necessário haver solo ou outro material adequado disponível.

A Tabela 15 apresenta os tipos de solos disponíveis em cada um dos aterros sanitários.

Tabela 15 - Material de recobrimento. Fonte: Autor.

Local	Material disponível para recobrimento
CTR-1	Jazida local
CTR-2	Areia argilosa
CTR-3	Jazida local Areia argilosa
CTR-4	Jazida local
CTR-5	Solo argiloso
CTR-6	Jazida local Areia argilosa e RCC segregado

Os seis aterros sanitários possuem em sua área jazida de solo e, em um caso, conta ainda com retirada de rochas para serem britadas e utilizadas na implantação dos drenos. Em particular, o CTR-6 utiliza ainda Resíduos de Construção Civil (RCC) segregados e que chegam de um município atendido.

Dos seis aterros a maioria apresenta solo argiloso, o que confere a eles, após compactação adequada, um coeficiente de permeabilidade baixo de 10^{-6} cm/s ou menor, sendo um material adequado para o recobrimento dos resíduos. No caso do RCC segregado, de forma expedita, se espera um coeficiente de permeabilidade maiores que 10^{-2} m/s que é comum para areias.

Quanto à realização da cobertura diária dos resíduos, a Tabela 16 apresenta os dados obtidos.

Tabela 16 - Cobertura diária dos resíduos. Fonte: Autor.

Local	Realiza cobertura diária	Remoção da cobertura ao início do turno de trabalho
CTR-1	Sim	Sim
CTR-2		
CTR-3		
CTR-4	Sim, inclusive com manta de sacrifício	Não, camada fina de solo arenoso
CTR-5	Não, turno de 24 horas	N/A
CTR-6		

A cobertura diária dos resíduos é realizada em todos os casos, exceto nos CTR-5 e CTR-6 pois funcionam durante as 24 horas do dia, não havendo paradas na operação, sendo desnecessário realizar o recobrimento diário da frente de operação. Nesse caso é realizado apenas o recobrimento intermediário e final.

Quanto aos aterros sanitários que adotam o recobrimento diário dos resíduos não é realizado um controle específico da espessura do solo depositado, sendo feito de forma visual apenas para garantir uma camada que recubra e não deixe exposto nenhum resíduo. O CTR-4 utiliza a manta de sacrifício, que pode ser de diferentes materiais, desde uma geomembrana bem fina de 0,8 mm até mesmo lona de caminhão.

A manta de sacrifício é uma boa maneira de impedir, principalmente em eventos de grandes pluviosidades, a infiltração de águas de chuva. Serve também para proteger locais mais sensíveis à ação da erosão causada pelas chuvas no solo utilizado no recobrimento. A Figura 17 apresenta um exemplo da utilização da manta de sacrifício em período chuvoso.

O CTR-4 quando utiliza solo para a cobertura diária, espalha uma fina camada de solo não compactado e, segundo os responsáveis, este solo não é retirado no início do turno seguinte de trabalho. Os CTR-1, 2 e 3, realizam a retirada dessa camada diária de solo. Conforme informado, não retirar a camada de solo pode acabar ocasionando dificuldades na drenagem dos lixiviados, uma vez que cria barreira e zonas de baixa permeabilidade, favorecendo o fluxo irregular dos lixiviados.



Figura 17 - Exemplo de utilização de manta de sacrifício. Fonte: Google.

A cobertura intermediária do maciço é uma importante ferramenta de controle ambiental e operacional, uma vez que é responsável por cobrir os resíduos no período em que não está ocorrendo a operação diária de disposição, mas que também não está pronta para ser finalizada e receber a camada de recobrimento final. Ou seja, a cobertura intermediária é utilizada em locais em espera que, a depender da demanda de resíduos recebidos e o tipo de implantação e operação adotados, voltará a ser utilizada. A Tabela 17 apresenta os dados sobre a cobertura intermediária dos resíduos.

Tabela 17 - Cobertura intermediária dos resíduos. Fonte: Autor.

Local	Realização da cobertura intermediária	Remoção da cobertura intermediária
CTR-1	Sim	Sim
CTR-2		
CTR-3		
CTR-4		
CTR-5		
CTR-6		

Em todos os casos é realizada a cobertura intermediária do maciço, assim como a sua remoção ao reiniciar a operação na área que estava em espera. Nesses casos, os aterros sanitários adotam um rigor maior se comparados com o recobrimento diário dos resíduos. Ou seja, a camada de solo ou de RCC segregado, passam por um acompanhamento topográfico desde a espessura desta camada assim como a compactação mecânica deste material.

Em geral, nos CTR-1, 2 e 3, é realizado de forma expedita pelo encarregado de operação, adotando uma camada bastante espessa em comparação com a camada de recobrimento diário, confiando na experiência do mesmo e sem a realização de um controle geotécnico e topográfico. Ainda assim, se espera que esta camada de solo tenha no mínimo 30 cm de espessura e, em alguns casos, se adota a mesma configuração da camada de recobrimento final com exceção da cobertura vegetal. Já nos CTR-4, 5 e 6, a equipe de topografia é responsável por acompanhar e dar as instruções sobre como será realizada a colocação desta camada de solo.

Além disso, O CTR-4 e 5 estão em fase de testes da adoção de uma geomembrana PEAD em substituição ao solo de cobertura e, de certa forma, impermeabilizando as faces dos taludes e as bermas do maciço de resíduo, como pode ser visto na Figura 18. Neste caso foi adotado no topo do maciço uma geomembrana PEAD para cobertura intermediária. Assim, possivelmente deve ocorrer menor contribuição das águas pluviais que percolam pelas camadas de solo de recobrimento na geração de lixiviados.

A adoção de geomembrana PEAD, no entanto, necessita que o sistema de drenagem de biogás esteja funcionando perfeitamente, pois pode acabar criando um estufamento da geomembrana devido ao aprisionamento do biogás. Assim, a drenagem deve garantir que o biogás seja captado e drenado, em sua maioria, pelos drenos verticais.



Figura 18 - Cobertura intermediária com geomembrana PEAD. Fonte: CTR.

Nos taludes e bermas que não voltarão a ter resíduos dispostos sobre eles, é adotado o cobrimento final dos resíduos, ou definitivo, finalizando as faces e implantando camadas de solo mais espessas e cobertura vegetal.

A Tabela 18 apresenta as especificações sobre o cobrimento final dos resíduos, adotadas pelos CTRs.

Tabela 18 - Cobertura final dos resíduos. Fonte: Autor.

Local	Controle e espessura da camada de cobertura final	Configuração da cobertura final
CTR-1	Visualmente	30 a 40 cm de solo compactado e cobertura vegetal com gramíneas
CTR-2		
CTR-3		
CTR-4	Sim, com auxílio de topografia	1 m de solo compactado e cobertura vegetal com gramíneas, algumas áreas com geomembrana
CTR-5		1 m de solo compactado e cobertura vegetal com gramíneas
CTR-6		30 a 40 cm de solo compactado e cobertura vegetal com gramíneas

Nos dados apresentados na Tabela 18, pode-se observar que os aterros sanitários de porte maior têm maior controle sobre a implantação do recobrimento final dos resíduos, realizando de forma assistida pela equipe de topografia. Enquanto nos de menor porte, novamente se utilizam da experiência do encarregado e dos envolvidos nesta ação para a execução mais próximo possível do projetado.

Em comum, todos utilizam camadas espessas de solo que é retirado de suas próprias jazidas, variando em espessura de 30 cm a 1 m. Após a camada de solo, até mesmo como forma de evitar a erosão do solo, todos adotam cobertura vegetal de gramíneas, utilizando comumente placas de grama do tipo esmeralda.

A Figura 19 ilustra bem a diferença entre os taludes de uma camada intermediária e final de um aterro sanitário, onde é possível observar que na parte inferior do maciço já foram implantadas as placas de grama nos taludes das camadas finalizadas. Nas outras partes, ainda está apenas com a camada de solo recobrindo os resíduos, sendo estas as camadas intermediárias.



Figura 19 - Cobertura final com grama na parte inferior, representando uma camada final do aterro sanitário e camadas intermediárias nas porções superiores. Fonte: CTR.

A implantação e manutenção da camada de recobrimento final é muito importante principalmente para o período pós encerramento do aterro sanitário, onde se cessam as operações e continuam os trabalhos de tratamento de lixiviados e monitoramento ambiental.

4.4 Sistema de Drenagem de Águas Pluviais

Outro importante componente de um aterro sanitário é o sistema de drenagem pluvial, principal responsável por coletar e encaminhar para fora do maciço a maior parte de águas pluviais que entre em contato com ele.

Todos os seis aterros sanitários objeto deste estudo estão em fase de operação e não foram finalizados, o que permite entender a evolução do sistema de drenagem pluvial ao longo do tempo.

Assim como o recobrimento dos resíduos, o sistema de drenagem pluvial também pode ser dividido em etapas, as quais coincidem com as etapas intermediária e final do recobrimento. Sendo assim, é implantado o sistema de drenagem pluvial provisório, o qual é instalado em áreas que já receberam o recobrimento intermediário e é geralmente composto por materiais e dispositivos que podem ser removidos e reaproveitados, evitando avarias devido aos

movimentos horizontais e verticais do maciço de resíduos causados pelos recalques e adensamentos.

Na Tabela 19 estão presentes os materiais e método de implantação dos sistemas de drenagem pluvial.

Tabela 19 - Sistema de drenagem pluvial. Fonte: Autor.

Local	Material utilizado	Drenagem provisória	Drenagem definitiva
CTR-1	Solo, calhas de concreto, rachão e geomembrana	Inversão de greide e calhas conformadas no solo manualmente e Colchão reno	Canaletas em concreto e descidas em Colchão reno
CTR-2			
CTR-3			
CTR-4		Leiras construídas no solo utilizado no recobrimento	Canaletas em concreto e descidas d'águas em gabião
CTR-5		Calhas conformadas no solo e cobertas com geomembrana	
CTR-6			

A drenagem temporária adotada pelos seis aterros sanitários é implantada de forma a não ser utilizar materiais que possam sofrer avarias ou quebras, onde em sua maioria, se utiliza apenas o próprio solo do recobrimento para criação dos dispositivos de drenagem.

O primeiro passo adotado após o recobrimento dos resíduos é realizar a inversão do greide das bermas, sempre em direção ao pé do talude, favorecendo que as águas escoem sempre em direção às calhas ao invés de seguirem pelos taludes, podendo ocasionar erosões e deslizamentos, como ilustrado na Figura 20.



Figura 20 - Inversão do greide em direção ao pé do talude. Fonte: CTR.

Na drenagem temporária apresentada na Figura 21, ao invés de colocar as canaletas, ou “meia-cana” de concreto, o solo é conformado de forma manual como uma calha. No CTR-6, é colocado uma geomembrana de PEAD para proteção do solo, evitando problemas como o carreamento de partículas do solo assim como diminuição da infiltração de águas pluviais.



Figura 21 - Drenagem de águas pluviais com geomembrana de PEAD. Fonte: CTR.

O CTR-5 utiliza leiras no solo, ou seja, pequenos montes de solo compactado e colocados sempre na crista e pé dos taludes. A leira na crista do talude funciona como uma barreira bloqueando o fluxo das águas pluviais em direção do talude, onde poderiam causar erosões e deslizamentos, e a leira no pé do talude tem como objetivo coletar as águas que descem dos taludes e as encaminhar para o seu ponto de desagüe, como ilustrado na Figura 22.

A leira é uma alternativa simples e de fácil execução, porém em eventos de chuvas fortes, a quantidade de água que essa leira terá que impedir a passagem pode ser demais e acabar causando o rompimento e carreamento desse material.

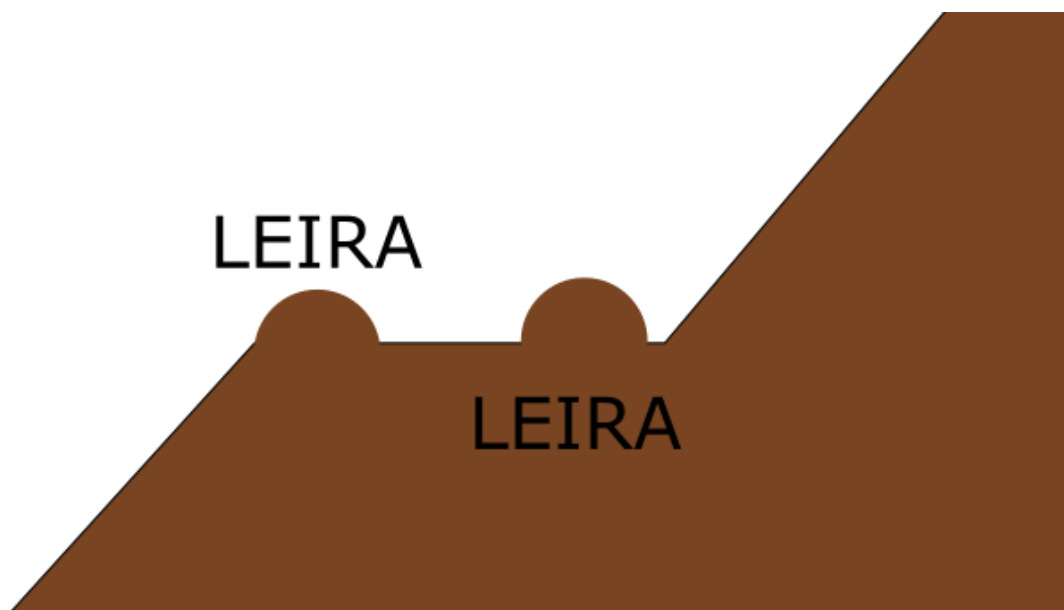


Figura 22 - Desenho ilustrativo de utilização de leiras na drenagem pluvial provisória. Fonte: Autor.

A drenagem definitiva é implantada em áreas que já tenham recebido o recobrimento final ou em áreas que não irão mais receber resíduos, constituída de elementos produzidos em concreto. Todos os seis aterros sanitários utilizam calhas e colchões de areia ou gabião para as descidas de águas. As linhas de drenagem pluvial construídas são direcionadas às caixas de passagem, as quais coletam águas para direcioná-las para as descidas d'água.

A Figura 23 apresenta a sequência de implantação dos elementos da drenagem pluvial, onde inicialmente é possível visualizar a abertura da vala onde serão colocadas as calhas, depois o local onde será construída a caixa de passagem em concreto e então a colocação das calhas em concreto para captação e encaminhamento das águas de chuva.



Figura 23 - Sequência de implantação da drenagem pluvial. Fonte: CTR.

A Figura 24 destaca um dos tipos de descidas d'água utilizadas em obras de drenagem pluvial, colchão reno utilizado nos CTR 1, 2 e 3, o qual em comparação ao gabião, é de mais fácil implantação e menor custo. Ainda é possível observar a caixa de passagem finalizada, a qual recebe contribuição dos drenos que captam as águas das chuvas e as encaminham para as descidas d'água. Os CTR-4 e 5 apresentavam as descidas d'água em geomembrana PEAD apenas, sem utilizar a pedra rachão para diminuir a velocidade de escoamento das águas. O CTR-5 utiliza gabião para as suas descidas d'água, nomeando as caixas de passagem e identificando-as para auxiliar na localização dos locais do aterro sanitário.



Figura 24 - Caixa de passagem de águas pluviais e colchão reno para descida d'água. Fonte: CTR.

4.5 Sistema de Drenagem de Lixiviados de Base

A drenagem de lixiviados na base do aterro sanitário tem grande importância na garantia da estabilidade e retirada de lixiviados do maciço, considerando os líquidos que percolam pelo maciço e que chegam até a base, onde está localizado o dreno principal responsável por encaminhar todo o lixiviado para as lagoas de armazenamento.

O sistema de drenagem de base, além de ser composto pelos drenos principais e secundários (ou coletores), também conta com a impermeabilização realizada na base, incluindo a geomembrana PEAD.

Além deste sistema realizar a retirada do lixiviado do maciço, também é importante pelo fato de garantir que não fique uma grande quantidade de líquidos na base do aterro sanitário, considerando que o sistema esteja com funcionamento adequado e tenha sido bem dimensionado.

Os seis aterros sanitários estudados apresentam impermeabilização de base conforme normas técnicas e boas práticas de engenharia para aterros sanitários, onde é realizado um trabalho de preparação da base com solo argiloso de espessuras variadas e então implantada a geomembrana sobre o solo compactado. A geomembrana utilizada, varia entre 1,5 mm e 3,0 mm de espessura, podendo ser lisa dos dois lados, texturizada de um lado ou ainda com textura dos dois lados.

A geomembrana texturizada é utilizada como forma de garantir uma maior fricção ou atrito entre a própria geomembrana e o solo e ou o resíduo disposto sobre ela. Do ponto de vista de segurança geotécnica, a textura atua no sentido de impedir que ocorram deslizamento causados por falta de atrito entre os componentes no sistema solo-geomembrana-resíduos.

A Figura 25 destaca alguns destes componentes da impermeabilização de base, onde se pode observar a geomembrana de 2,00 mm já disposta sobre o solo da área que foi trabalhado anteriormente, assim como a camada de solo que é colocada acima da geomembrana para realizar a proteção mecânica e evitar potenciais rasgos e furos devido ao contato de maquinário pesado e resíduo diretamente com a mesma. A execução da camada de proteção mecânica varia em sua espessura entre os seis aterros sanitários, assim como a espessura da geomembrana de PEAD.



Figura 25 - Preparação e aplicação da impermeabilização de base. Fonte: CTR.

A Figura 26 apresenta um croqui esquemático típico de como é executada a preparação da área, desde a compactação do solo da base até a implantação e ancoragem da geomembrana e a proteção mecânica.

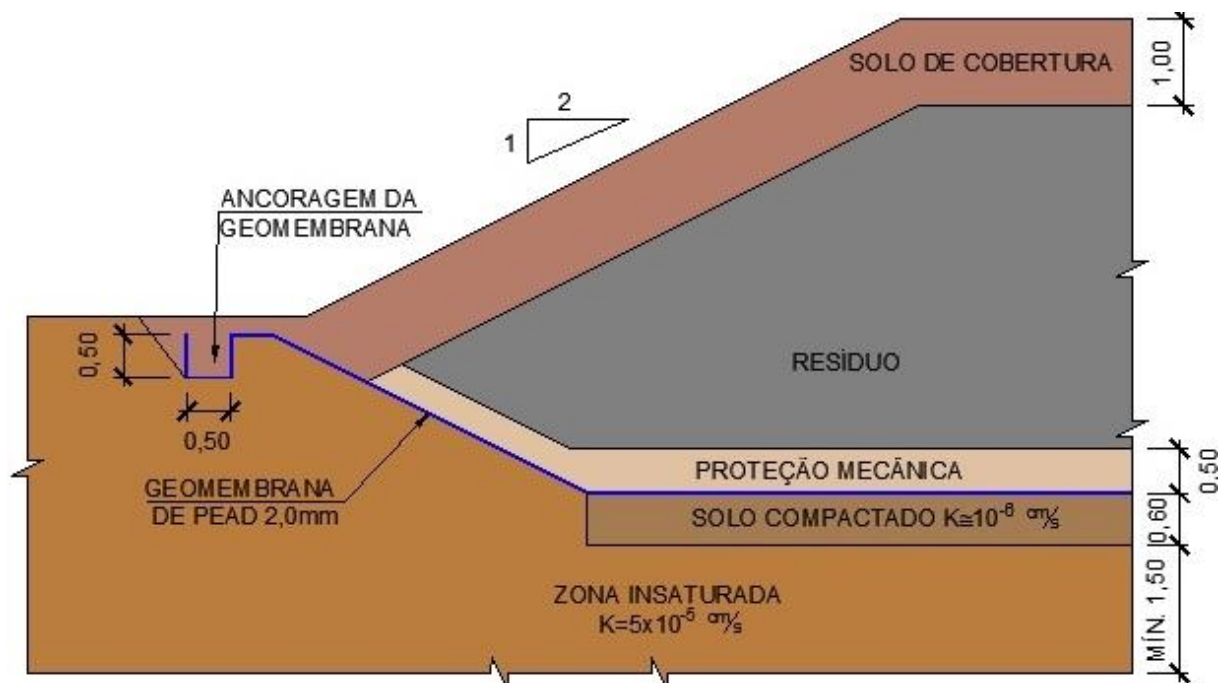


Figura 26 - Croqui esquemático da preparação da impermeabilização de base. Fonte: Autor.

A Tabela 20 apresenta os dados sobre o sistema de drenagem de base nos seis aterros sanitários.

Tabela 20 - Tipo de sistema de drenagem de base. Fonte: Autor.

Local	Tipo de sistema implantado	Drenos escavados ou acima da camada de impermeabilização	Método de construção
CTR-1	Espinha de peixe	Acima da camada de proteção mecânica	Tubulação em PEAD envolta por pedra rachão (de 80 a 400 mm) como meio drenante, rachinha (de 40 a 80 mm) e brita 2 como berço do tubo e geotêxtil na base não envolvendo o dreno
CTR-2		Escavados e abaixo da cota da geomembrana	
CTR-3		Acima da camada de proteção mecânica	
CTR-4		Escavado na camada de proteção mecânica	Tubulação em PEAD envolta por pedra rachão (de 80 a 400 mm) como meio drenante e geotêxtil para evitar colmatção
CTR-5			
CTR-6			

Todos utilizam o mesmo tipo de sistema, a espinha de peixe, comumente adotada em projetos de aterros sanitários e que apresenta uma boa área de captação, com seus drenos secundários interceptando perpendicularmente o fluxo preferencial dos lixiviados e tendo o dreno principal como responsável pelo encaminhamento destes para as lagoas de armazenamento.

Do ponto de vista financeiro, o sistema de drenagem de lixiviados em formato espinha de peixe é menos custoso que o colchão drenante, devido a quantidade de material necessário e também de equipamentos para a sua implantação. Do ponto de vista operacional e geotécnico, o colchão drenante em comparação a espinha de peixe, apresenta uma maior área de captação

e drenagem, sendo então mais eficiente que a espinha de peixe na remoção de lixiviados. No entanto, considerando custos de implantação e operacionais, os aterros sanitários no Brasil, em sua maioria adotam a espinha de peixe.

Ainda sobre a implantação do sistema de drenagem de lixiviados na base do aterro sanitário, foi observado que os drenos foram implantados de três formas diferentes, sendo a mais comum logo acima da camada de proteção mecânica (Figura 27) que é composta por solo argiloso compactado com espessura de 60 a 80 cm para criar uma proteção entre a passagem dos veículos e equipamentos pesados que estarão na área impermeabilizada pela geomembrana.

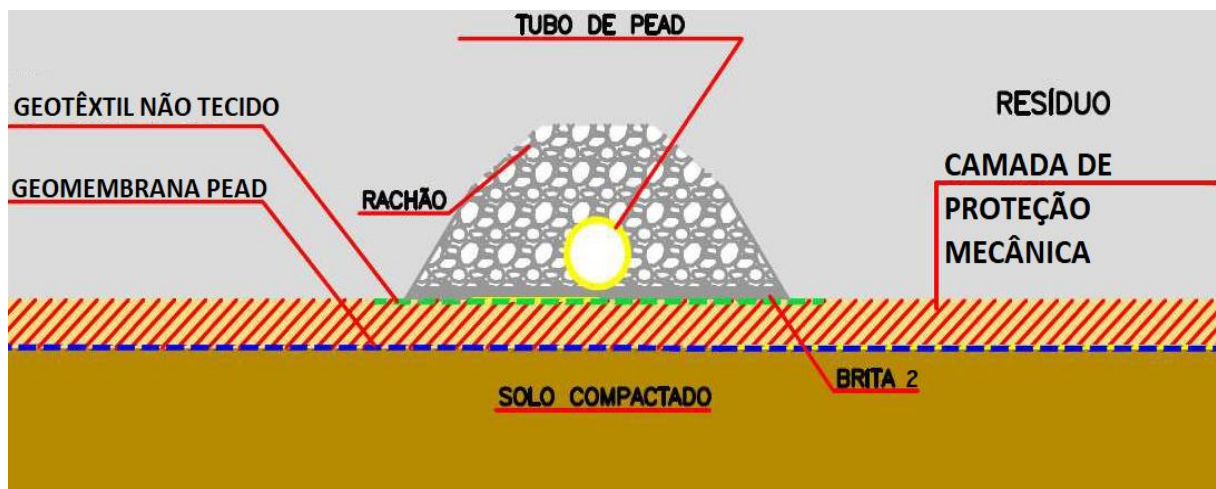


Figura 27 - Croqui esquemático do dreno principal acima da camada de proteção mecânica. Fonte: Autor.

Em outro caso, a base do aterro sanitário foi preparada e feita toda a terraplanagem necessária para atender ao projeto, porém foram abertas valas ainda no solo da base para a implantação do dreno principal, o qual tem uma tubulação perfurada de PEAD em seu interior, com cotas menores do que a base (Figura 28), criando um ponto de menor pressão hidráulica. Essa forma ajuda no controle da lâmina de lixiviados na base. Considerando um cenário ideal, esta forma diminui a altura da lâmina em comparação aos outros métodos utilizados nos outros locais.

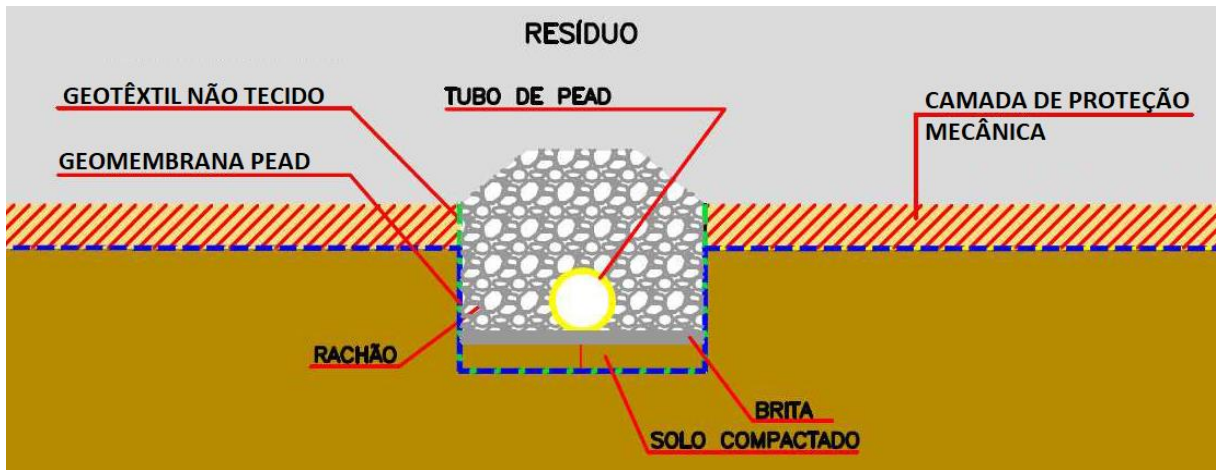


Figura 28 - Croqui esquemático do dreno principal escavado no solo. Fonte: Autor.

O último caso apresentou uma proposta análoga à anterior, no entanto, a vala foi aberta diretamente na camada de proteção mecânica (Figura 29). Em comparação com a primeira situação, esta solução pode representar um melhor controle da espessura da lâmina de lixiviados na base do aterro sanitário, porém ainda maior que a do caso anterior.

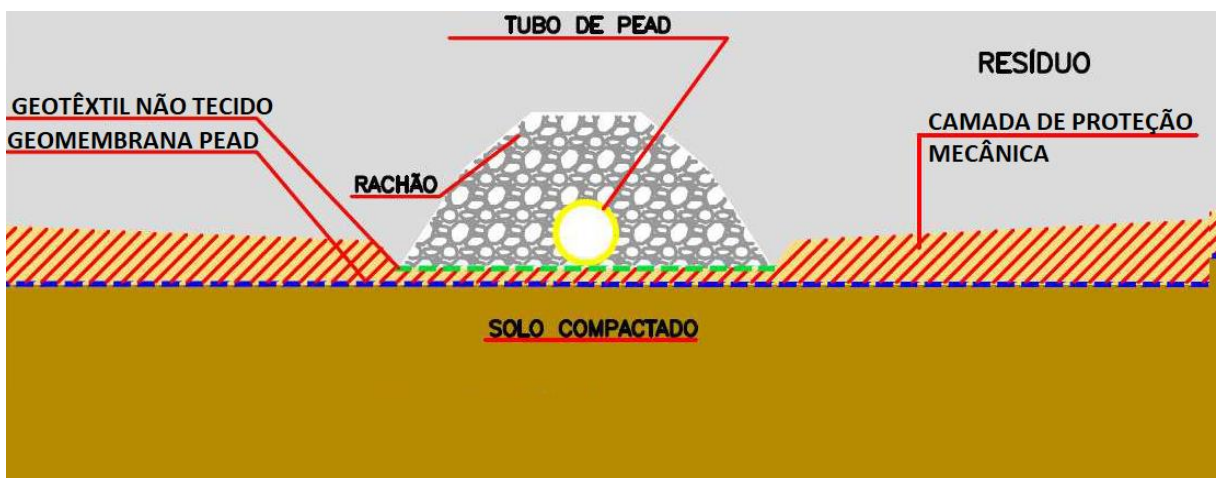


Figura 29 - Croqui esquemático do dreno principal escavado na camada de proteção mecânica. Fonte: Autor.

Quanto ao material utilizado para a construção dos drenos secundários e principais, todos utilizam tubulação de PEAD perfurada envolta por rachão como material agregado e filtrante. Nos três primeiros aterros sanitário é feito um leito com brita e rachinha sobre um geotêxtil não tecido, para melhor acomodação da tubulação, como pode ser visto nas Figura 30 e Figura 31.



Figura 30 - Leito de brita para acomodação da tubulação do dreno principal. Fonte: CTR.



Figura 31 - Dreno principal no meio da área com tubulação e secundários direcionando os lixiviados ao dreno principal. Fonte: CTR.

Os outros aterros sanitários adotam método parecido, porém finalizam a construção do dreno envolvendo todo o meio drenante com o geotêxtil não tecido, como pode ser visto na Figura 32. Essa construção é realizada com o intuito de diminuir a possibilidade de material

particulado como partículas de solo ou do próprio resíduo, causar algum tipo de entupimento ao fechar totalmente os furos existentes na tubulação.



Figura 32 - Geotêxtil não tecido envolvendo os drenos de base. Fonte: CTR.

O material agregado utilizado pode passar pelo processo de biocolmatação, onde ocorre o desenvolvimento de um biofilme que acaba por diminuir os vazios entre o material agregado, ocasionando a diminuição na vazão de lixiviados.

De acordo com testes realizados por McIsaac *et al.* (2007), em condições saturadas, onde o material agregado se encontra totalmente submerso, ocorrendo um maior tempo de retenção do lixiviado, existe maior possibilidade de crescimento microbiano e desenvolvimento de biofilme. Esse biofilme em contato direto também com algumas partículas de resíduos ou ainda de solo, acabam por aglutinar elas, diminuindo ainda mais a porosidade do meio.

Ainda sobre o tipo de material utilizado, nos casos dos agregados de pedreiras, ocorre uma variação de granulometria, conseqüentemente a quantidade de vazios pode ser variável também neste meio drenante.

Yu *et al.* (2012) através de modelo matemático chamado de “BioClog-2D” estabeleceu que em drenos que possuem material com granulometria maior possuem maior tempo de funcionamento em condições adequadas, o que ele chama de tempo de serviço; no entanto, quanto maior o comprimento do dreno, menor o seu tempo de serviço. Ainda foi possível analisar que a porosidade diminui de acordo com proximidade do final do dreno principal dentro

da célula. Isso indica que existe a possibilidade de haver entupimentos na tubulação principal logo em sua saída, causando um efeito cascata em toda sua continuidade anterior.

Quanto aos aterros sanitários que utilizam o geotêxtil não tecido para envolver os drenos, a principal preocupação é a colmatção do mesmo, porém este é utilizado para evitar que ocorra a colmatção do meio drenante.

Em estudo realizado por Liu *et al.* (2018), o principal responsável por causar um aumento da lâmina de líquidos na base do aterro sanitário é o geotêxtil não tecido que se encontra colmatado, impedindo a passagem dos líquidos, criando assim uma camada de permeabilidade muito baixa.

Na Figura 33, está apresentado o nível de saturação dos resíduos logo acima do geotêxtil não tecido, conforme apresentado por Liu *et al.* (2018). Como pode ser observado, em situações que existe um geotêxtil colmatado, a saturação do meio logo acima é de 100%, ou seja, cria uma barreira com baixa permeabilidade.

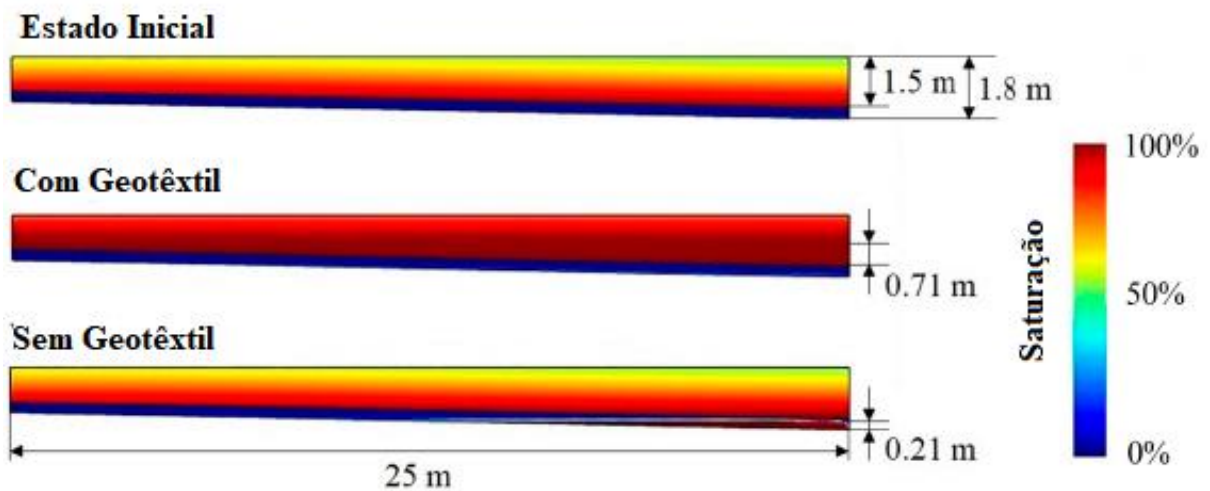


Figura 33 - Saturação nos resíduos e no geotêxtil. Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2018).

Considerando então o que foi apresentado tanto da colmatção do meio drenante sem o geotêxtil não tecido, assim como com a sua aplicação, um cenário de incerteza é criado na tomada de decisão do projeto e implantação do sistema de drenagem de líquidos. Como apresentado na Figura 33, ainda que o geotêxtil possa atuar como um filtro para impedir a colmatção do meio drenante, existe um ganho de ter um menor nível de saturação na base do aterro sanitário.

Segundo Giroud (2016), ocorrer migração do lixiviado pela geomembrana é inevitável, ou seja, quanto menor for a lâmina de lixiviados na base do aterro sanitário, menor a quantidade de líquidos que poderão migrar através da impermeabilização da área.

Ainda sobre o assunto, Giroud diz que ao final do processo de implantação da geomembrana, se acredita, que possam existir de 1 a 5 furos por ha, podendo chegar a 25 furos em situações com menor controle de qualidade. Caso os furos tenham 1 mm², é possível ter uma vazão de 200 l/h/ha com apenas 5 furos.

O sistema de drenagem de lixiviados, principalmente o de base do aterro sanitário, é um componente essencial; no entanto, devido à natureza da atividade e dificuldade de acesso a estes após o aterramento dos resíduos, ter um controle do que está acontecendo nos drenos e monitorar se estão funcionando como projetados é um desafio para todos os envolvidos na construção e operação de aterros sanitários. Assim, alguns projetos buscam formas de ter acesso aos drenos de base para poder realizar verificações, ainda que muitas vezes pontuais, construindo poços de visita e caixas de passagem.

A Tabela 21 resume as informações sobre instrumentos de monitoramento e a instalação de instrumentação geotécnica nos aterros pesquisados.

Tabela 21 - Possibilidade de manutenção e monitoramento do sistema de drenagem de base. Fonte: Autor.

Local	Possibilidade de manutenção e desobstrução	Possui piezômetros
CTR-1	Poço de visita na saída do dreno principal	Sim, dois de câmara simples para medição de líquidos
CTR-2		Não
CTR-3		
CTR-4	Poços de visita dentro e fora do aterro	Sim, três de câmara simples para medição de líquidos
CTR-5	Não	Não
CTR-6	Poços de visita dentro e fora do aterro	

Dos seis aterros sanitários, apenas dois possuem piezômetros, algo que para o porte deles, tanto em relação ao espaço físico ocupado quanto também pela quantidade de resíduos,

se mostra insuficiente. Nos outros quatro aterros nem piezômetros foram instalados, não havendo a possibilidade de monitorar as pressões de gases e líquidos no interior do maciço.

O acompanhamento dos dados dos piezômetros não foi obtido e de acordo com as informações, os piezômetros são todos para a leitura da lâmina de lixiviados e não para medir a pressão de líquidos e gases, pois o tubo instalado possui ranhuras, permitindo a entrada de líquidos, ao longo de todo seu comprimento.

Somente um aterro sanitário não possui ainda poços de visita ou caixas de passagem para verificação e/ou resolução de problemas ocasionados nos drenos. Os poços de visita ou caixas de passagem são geralmente implantados logo acima dos drenos principais de base, facilitando o acesso. Para os que tem poços de visita, caso seja detectada alguma obstrução na tubulação, é possível realizar algum procedimento para desobstrução. Já nos drenos secundários, em nenhum dos aterros sanitários existem poços de visita ou caixas de passagem.

Ainda como meio de estudar e realizar uma análise comparativa foi solicitada uma estimativa de custos de implantação do sistema de drenagem de lixiviados, no entanto nenhum dos aterros sanitários informou os valores.

4.6 Sistema de Drenagem de Lixiviados entre Camadas

A drenagem de lixiviados entre as camadas é implantada com o objetivo de captar os lixiviados logo nas camadas mais superiores, evitando então que seja necessário aguardar que os líquidos percolem ao longo de todo o perfil do maciço de resíduos, já captando o mesmo e o encaminhando para os drenos verticais, responsáveis por encaminhar os líquidos para a base do aterro sanitário e os gases para a atmosfera. Sendo assim, este é um sistema tão importante quanto o de drenagem de lixiviados na base.

Considerando que os aterros sanitários que são objetos deste estudo possuem entre 9 e 19 camadas projetadas, alcançando entre 45 a 95 m de alturas, o sistema de drenagem entre camadas se torna indispensável, ainda mais ao se considerar os resultados obtidos por Di Trapani *et al.* (2015), em que aterros sanitários com 35 m ou mais de altura, apresentam fluxo lateral de lixiviados.

Os dados que foram obtidos sobre a implantação dos drenos entre camadas estão presentes na Tabela 22.

Tabela 22 - Tipo de sistema de drenagem entre camadas. Fonte: Autor.

Identificação da unidade	Implantado ou não	Tipo de sistema implantado	Método de construção
CTR-1	Sim, em todas camadas	Espinha de peixe e interligação dos drenos verticais	Abertura de valas nas dimensões da concha da escavadeira/retroescavadeira, criando um dreno cego com rachão
CTR-2	Sim, porém não nas duas camadas inferiores		
CTR-3			Abertura de valas nas dimensões da concha da escavadeira/retroescavadeira, criando um dreno cego com rachão e envolto com geotêxtil
CTR-4	Sim, em todas camadas		
CTR-5			
CTR-6			

Dos seis aterros sanitários, apenas dois não implantavam a drenagem de lixiviados entre as camadas, porém, com base em observações operacionais passaram a fazê-lo, pois se percebeu que existiam muitos locais com afloramentos de lixiviados em taludes e bermas. Ao se adotar a drenagem em todas as camadas, a incidência destas diminuiu consideravelmente.

A drenagem de lixiviados entre camadas é composta por drenos horizontais e também pelos verticais e ainda pelos drenos de pé de talude, como apresentado na Figura 34.

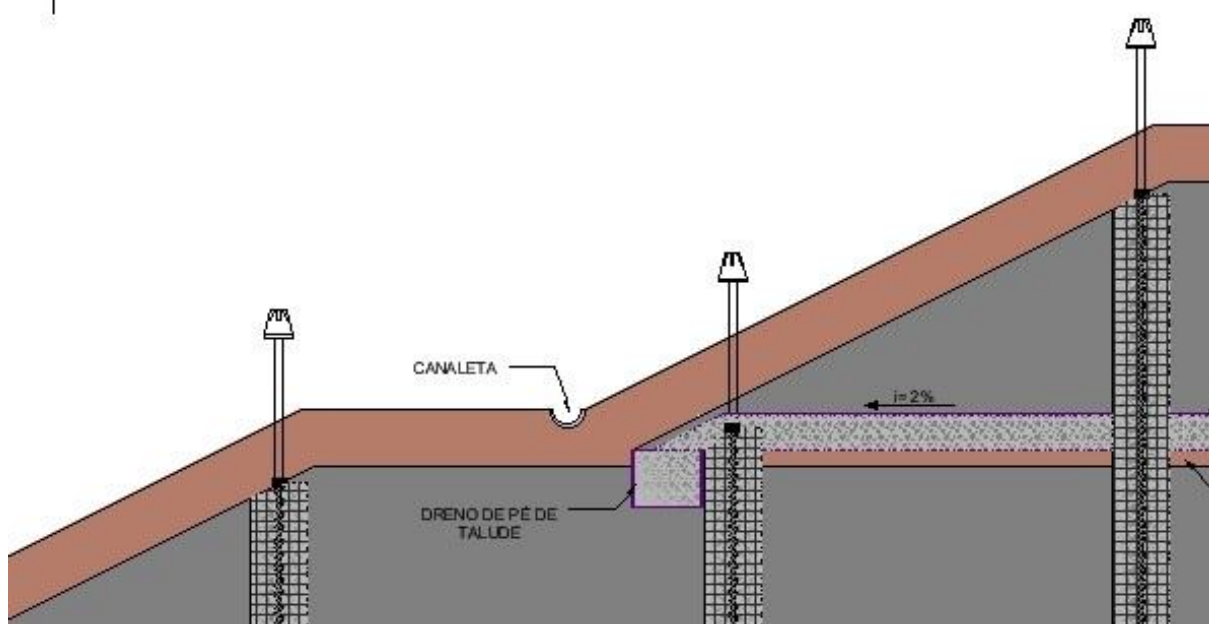


Figura 34 - Croqui esquemático da drenagem de lixiviados entre camadas. Fonte: CTR.

A configuração destas drenagens, de certa forma, segue o mesmo implantado na base do aterro sanitário, no mesmo formato espinha de peixe, porém até mesmo para aumentar a área de captação se faz a ligação entre os drenos verticais, criando drenos horizontais entre eles, como pode ser visto na Figura 35.

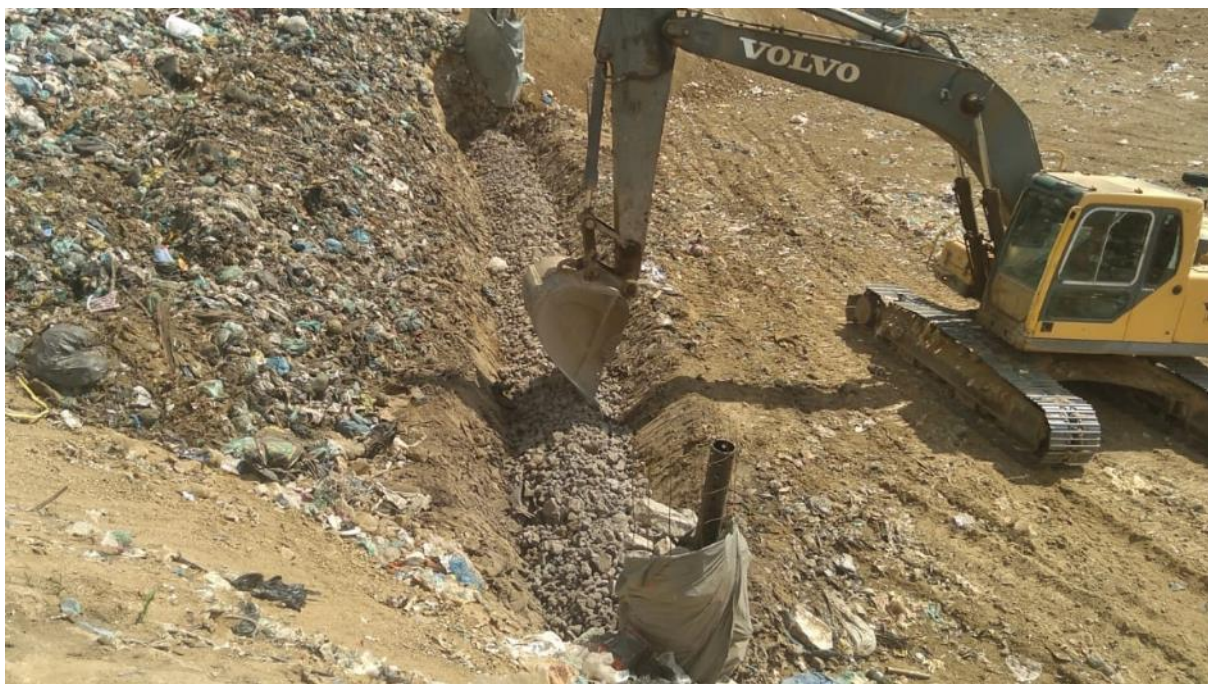


Figura 35 - Implantação de dreno horizontal ligando um dreno vertical ao outro. Fonte: CTR.

A execução dos drenos é realizada conforme a disponibilidade de maquinário, onde o tamanho da vala aberta é do mesmo tamanho da concha da escavadeira ou da retroescavadeira.

O material utilizado é o mesmo que o da base, rachão, geotêxtil não tecido e tubos. No caso dos três primeiros aterros sanitários, a vala é aberta e é colocado o rachão como meio drenante. Nos outros, além do rachão também é utilizado o geotêxtil não tecido, porém no caso do CTR-6, os drenos são construídos com tubulação perfurada em seu interior. Os potenciais problemas nos materiais utilizados são os mesmo que dos drenos da base do aterro sanitário, como por exemplo a colmatação do meio drenante.

Quanto aos drenos verticais, todos apresentam métodos de construção parecidos, mudando apenas o diâmetro total dos drenos, variando entre oitenta cm à 1,30 m. Um aspecto importante desses drenos é garantir que o gás seja encaminhado para a superfície do aterro sanitário, porém, até mesmo como medida de controle ambiental, no topo dos drenos são implantados queimadores de gases (flares) para evitar a emissão de gases de efeito estufa como o metano, ou ainda, captados e encaminhados para usinas de geração de energia a partir do biogás.

Estes drenos também são construídos utilizando material agregado como meio drenante, porém para manter sua forma e também proteger o tubo perfurado de PEAD que fica em seu centro, uma tela metálica fica na periferia do dreno, como pode ser visto na Figura 36.

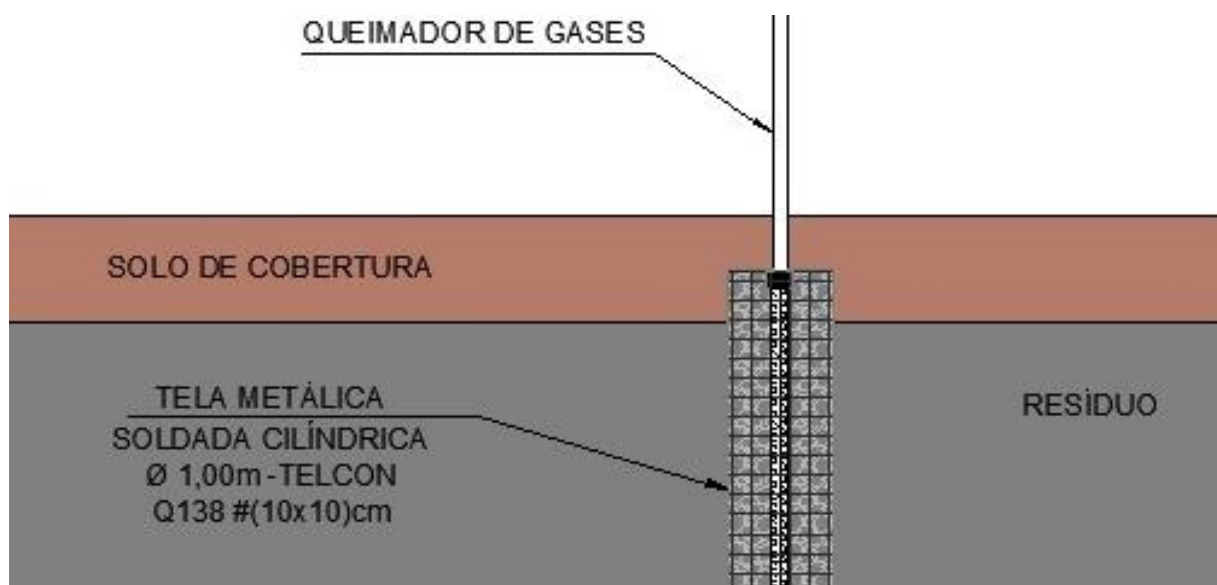


Figura 36 - Croqui esquemático da construção do dreno vertical no CTR-6. Fonte: CTR.

Na Tabela 23 se observa que todos os aterros sanitários utilizam o dreno de pé de talude, que nada mais é do que um dreno horizontal.

Tabela 23 – Aterros sanitários que utilizam dreno de pé. Fonte: Autor.

Local	Utiliza dreno de pé de talude
CTR-1	Sim
CTR-2	
CTR-3	
CTR-4	
CTR-5	
CTR-6	

A Figura 37 apresenta um esquema de como o dreno de pé de talude é implantado. Uma vala é escavada com material drenante, com a importante função de captar qualquer lixiviado que possa estar fluindo para fora da camada em questão, evitando o aparecimento de afloramentos. O dreno de pé fica sempre próximo ao final inferior do talude da camada superior de resíduos. Assim o fluxo de lixiviados desta camada superior é interceptado e coletado por este dreno.

O dreno de pé de talude é usualmente implantado enquanto a operação está acontecendo, porém em alguns casos, o dreno pode ser feito após a finalização do talude da camada superior, ainda mais nos casos em que se observam afloramentos.

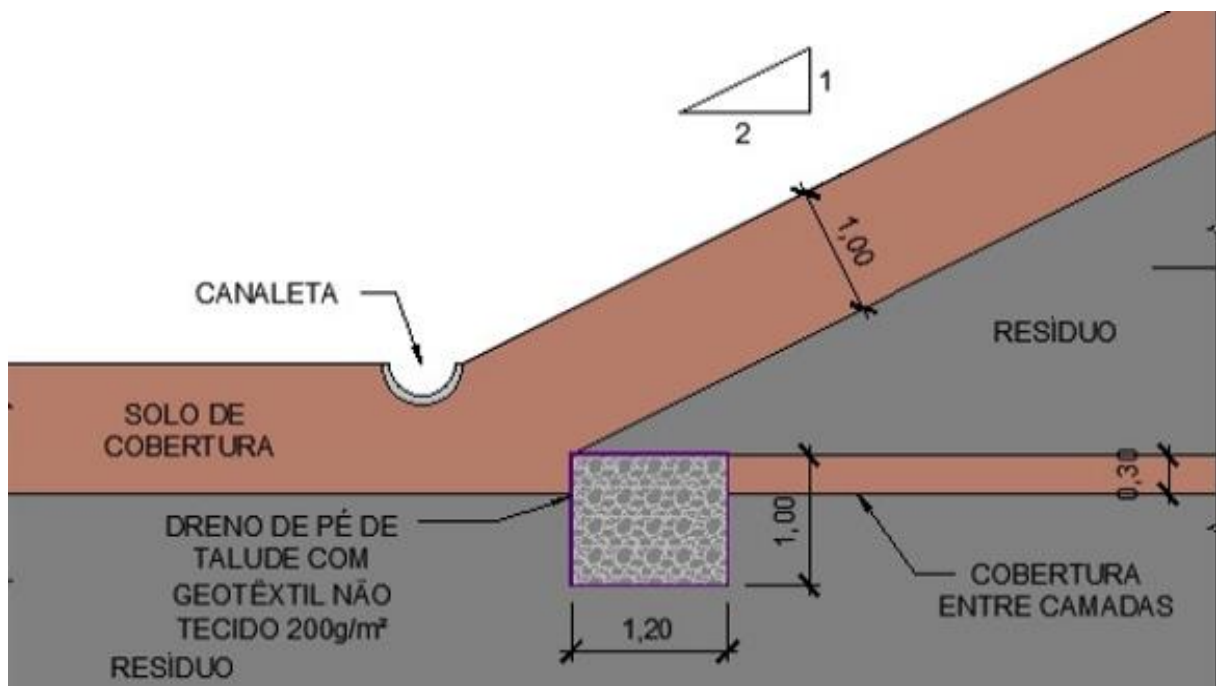


Figura 37 - Croqui esquemático da implantação de um dreno de pé de talude. Fonte: CTR.

Ainda como meio de estudar e realizar uma análise comparativa, foi solicitada uma estimativa de custos de implantação do sistema de drenagem de lixiviados; no entanto nenhum dos aterros sanitários informou os valores.

4.7 Ações Emergenciais

Para entender alguns cenários de maior dificuldade operacional, como por exemplo o afloramento de lixiviados em taludes e/ou bermas e operação em dias de chuvas, foi questionado aos envolvidos na operação quais ações eram realizadas com o intuito de diminuir os impactos causados.

4.7.1 Operações em Dias de Chuva

Dentre as principais situações elencadas pelos envolvidos na operação dos aterros sanitários foi destacada a operação em períodos de chuvas, pois essas, além de contribuir com o aumento na geração de lixiviados, também dificultam o trânsito de veículos e equipamentos. Parte das vias e áreas de acesso e trânsito nos aterros sanitários são de solo natural, e em muitos casos, sem pavimentação como asfalto ou concreto.

Em todos os aterros sanitários, para melhorar as condições de trafegabilidade das áreas sem pavimentação, são utilizados agregados como pedra rachão e britas para criar um pavimento onde os veículos e equipamentos pesados conseguem se movimentar sem dificuldades. Este tipo de preparação do pavimento é muito utilizado na frente operacional, pois é de fácil execução e permite a sua reutilização quando for necessário retirar este material agregado. Os CTR-4, 5 e 6, tem em parte de suas vias de acesso ao aterro sanitário, pavimentação asfáltica.

A Tabela 24 apresenta a situação da operação dos seis aterros sanitários em dias de chuva.

Tabela 24 - Situação da operação em dias de chuvas. Fonte: Autor.

Local	Operação em dias de chuva
CTR-1	Normal, na mesma frente operacional
CTR-2	
CTR-3	
CTR-4	
CTR-5	
CTR-6	

Ainda que todos tenham confirmado que a operação em dias de chuvas é complicada e muitas vezes um desafio, todos mantêm a operação na mesma frente operacional normal de dias sem chuvas. A operação de recebimento de resíduos não pode ser interrompida nos dias de chuva, pois é algo inerente da atividade e os resíduos são gerados diariamente.

A justificativa para tal é que, preparar uma área separada da frente operacional utilizada no dia a dia não apresenta vantagens, uma vez que é necessário ter gastos na aquisição de material mineral ou equiparado, como britas e pó de pedra, para preparação da pavimentação. Neste caso, pode se considerar também o fator econômico, em que se faz necessário investir grande quantia de dinheiro para aquisição deste material britado.

Outro fator é que seria necessário deixar uma área com toda a drenagem de lixiviados e impermeabilização de base pronta para estes períodos de chuvas, os quais apesar de serem consideráveis, não são a maior parte dos casos.

Importante também considerar que estes aterros sanitários ocupam grandes áreas e as alternativas locacionais desta frente operacional seriam distantes da frente operacional normal. Essa distância para deslocamentos de equipamentos pesados como tratores e escavadeiras acaba sendo um empecilho, sendo necessário a utilização de carreta tipo prancha de transporte.

Em períodos de chuvas, em locais mais próximos da frente operacional, os envolvidos na operação dos CTR-1, 2 e 3 buscam realizar intervenções e preparações para evitar maior acúmulo e fluxo de águas pluviais para locais que o resíduo ainda não foi coberto. Uma das ações é o que chamaram de “cupinzeiro”, que consiste em criar barreiras com solo em volta dos drenos verticais, evitando a entrada de água, conforme apresentado na Figura 38. Eles são feitos inicialmente envolvendo e protegendo o dreno com geotêxtil não tecido e então colocando uma camada de solo ao seu redor formando esse monte de solo que lembra o formato de cupinzeiro.



Figura 38 - "Cupinzeiro" para proteção dos drenos verticais. Fonte: CTR.

Outra ação realizada é a implantação de pequenas barreiras feitas com leiras de solo para evitar que as águas pluviais consigam escoar para dentro dos drenos verticais.

Nos CTR-4, 5 e 6, essas medidas não são adotadas pois os drenos verticais são todos convertidos para a captação do biogás para aproveitamento, o que faz com que o dreno deixe de ficar exposto e seja totalmente “selado” com solo ao seu redor, além de contar com tubulação em PEAD lisa, o que contribui para evitar que grande parte das águas pluviais consiga escoar para dentro deles. Ainda, no CTR-4 e 5, alguns locais do maciço de resíduos apresentavam cobertura em geomembrana de PEAD cobrindo a sua área superior, criando uma barreira e evitando a infiltração de águas pluviais.

Os CTR-2 e 3 estavam em processo de estudos para captação e geração de energia a partir do biogás. No caso do CTR-1 já existia a captação do gás para este fim.

Nos períodos de chuvas também é comum o aparecimento de erosões causadas pela ação do fluxo superficial das águas, expondo o resíduo que outrora havia sido recoberto com uma camada de solo. O escoamento das águas pluviais, principalmente em taludes e bermas que estão em etapas de operação diária ou ainda intermediária, sem uma proteção vegetal ou de manta de sacrifício, pode acabar causando uma maior geração de lixiviados devido o contato direto da água com os resíduos, assim como propiciar o afloramento de lixiviados.

Nestes casos, os responsáveis pela operação dos aterros sanitários necessitam aguardar que o solo aplicado como recobrimento, assim como o solo da jazida, esteja seco para realizar a sua extração, transporte e aplicação nos locais que necessitam recuperação após a erosão.

Esta situação acaba causando uma fragilidade operacional e ambiental, uma vez que o que separa as águas pluviais do contato com o resíduo é o solo que foi erodido, sendo assim, inevitavelmente haverá o carreamento destas águas para as drenagens pluviais e áreas externas à célula do aterro sanitário. No entanto, considerando o potencial poluidor, se faz necessário avaliar o efluente gerado nestes casos e se realmente é nocivo para o meio ambiente.

4.7.2 Ações para Solução de Afloramentos

Outra situação problemática e que necessita de ações emergenciais são os afloramentos de lixiviados em bermas e taludes. Isso pode acontecer devido à problemas na drenagem de lixiviados, caminhos preferenciais devido a heterogeneidade dos resíduos aterrados, diferenças entre a pressão interna e externa no maciço de resíduos, grandes índices de pluviosidade que acabam por aumentar muito a umidade do maciço, falhas na camada de cobertura e erosões causadas pela ação das águas pluviais. As Figura 39 e Figura 40 apresentam dois casos de afloramento, sendo um no talude e outro na berma do maciço de resíduos.



Figura 39 - Afloramento de lixiviados na face do talude. Fonte: CTR.



Figura 40 - Afloramento de lixiviados na berma. Fonte: CTR.

Nestes casos, o lixiviado acaba extrapolando o limite imposto pelo recobrimento dos resíduos e fica aparente, podendo acarretar em eventuais problemas ambientais caso seja carregado para fora da área impermeabilizada.

A Tabela 25 apresenta as ações realizadas para solução deste problema.

Tabela 25 - Ações emergências em casos de afloramento de lixiviados. Fonte: Autor.

Local	Ações para solução de afloramentos de lixiviados
CTR-1	Dreno de pé e de face de talude
CTR-2	
CTR-3	
CTR-4	
CTR-5	Verificação dos drenos mais próximos e desobstrução/recuperação
CTR-6	

Para solução destes afloramentos em taludes e bermas, são realizados reparos e criação de novos drenos para garantir que o lixiviado seja captado e encaminhado para o sistema de drenagem de lixiviados da base dos aterros sanitários.

No caso dos afloramentos em taludes, todos os seis locais pesquisados implantam drenos de face de talude, os quais são drenos que se iniciam ainda nas bermas, descem pelo talude e se conectam ao dreno vertical ou ainda ao dreno de pé de talude mais próximo. A Figura 41 apresenta a ligação de um dreno de pé de talude que foi criado na berma acima e que para ter encaminhamento, foi construído um dreno de face, ligando o dreno de pé de talude (Figura 42) ao dreno vertical mais próximo.



Figura 41 - Dreno de face de talude ligando um dreno de pé de talude ao dreno vertical. Fonte: CTR.

Para a solução de afloramentos em bermas, se implantam novas linhas de drenos horizontais, principalmente nos pés dos taludes, local em que a maioria dos casos, segundo os responsáveis pela operação dos aterros sanitários, se observa o surgimento de lixiviados. O método mais utilizado é sempre realizar a abertura de valas no maciço com caimento para o dreno vertical mais próximo, então segue para a colocação do material drenante e fechamento da vala, e por fim, se instala o geotêxtil não tecido para criar uma camada de proteção e evitar a entrada de solo no meio das pedras.

A Figura 42 apresenta a implantação de um dreno de pé de talude, mostrando a vala já aberta com a pedra como meio drenante e depois com o geotêxtil não tecido aplicado sobre elas.



Figura 42 - Implantação do dreno de pé de talude, na primeira parte o dreno aberto com o meio drenante e após a aplicação do geotêxtil não tecido. Fonte: CTR.

Os locais onde são observados maiores índices pluviométricos também apresentam maiores quantidade de líquidos juntos aos seus resíduos, uma vez que os resíduos são colocados pelos habitantes das cidades, geralmente, em locais abertos e sem cobertura, além de que no transporte, a água da chuva pode acabar entrando em contato com os resíduos.

4.8 Discussão dos Resultados

Em geral, os seis aterros sanitários objetos deste estudo, apresentam características de implantação e operação parecidas, adotando materiais, maquinários e rotinas operacionais que são similares. O conhecimento técnico e execução estão no mesmo patamar que em outros países que adotaram previamente a tecnologia de aterros sanitários para disposição final de resíduos.

Das informações preliminares, importante salientar que todos irão possuir alturas que favorecem o aparecimento de fluxos horizontais de lixiviados, impactando diretamente no sistema de drenagem destes. Este, deve sim ser executado em todas as camadas do maciço de resíduos, visando mitigar potenciais problemas como afloramentos de lixiviados em bermas e taludes.

Do ponto de vista de monitoramento operacional e geotécnico, importante destacar que até mesmo um aterro sanitário de menor porte, em relação à quantidade de resíduos recebidas diariamente, faz este acompanhamento. Em comum, todos realizam a leitura de deslocamentos horizontais e verticais (recalques) com o auxílio de marcos superficiais, controle de entrada de resíduos por balança e de volume ocupado no aterro sanitário. Importante salientar que todos conseguem desenvolver seu trabalho de forma a conseguir otimizar a utilização de espaço e volume, aumentando a sua vida útil. No entanto, falham em não terem piezômetros implantados, importante ferramenta do monitoramento geotécnico.

O recobrimento dos resíduos, seja o diário, intermediário ou final é realizado em todos os seis aterros sanitários, atendendo às normas técnicas e legislações ambientais, visando ainda evitar a contribuição das águas pluviais no aumento da geração de lixiviados. A principal particularidade apontada como uma possível solução para o recobrimento dos resíduos é a adoção de geomembrana. Isto permite impedir que as águas pluviais incidam diretamente sobre os resíduos e percolem através deles, porém requer um investimento considerável.

O sistema de drenagem pluvial quando finalizado, adota calhas de concreto. Porém o interessante é ver como é realizada de forma temporária esta drenagem, buscando alternativas de baixo custo e/ou de maior eficiência, como visto no aterro sanitário que utiliza geomembrana PEAD em calhas formadas no solo de recobrimento dos resíduos.

A drenagem de lixiviados de base já apresenta diferenças interessantes entre elas, como na construção dos drenos primários. No caso que mais se destaca, é possível observar um dreno principal desenvolvido a partir da abertura de uma vala no solo local, que, em comparação aos outros, está em uma cota mais inferior. Isso, em teoria, representa que a lâmina de lixiviados na base, terá uma altura menor, em comparação com as outras duas formas adotadas e em condições análogas. Porém, essa forma de construção deste dreno necessita de maior cuidado para a preparação do solo e posteriormente na implantação da geomembrana PEAD.

Da drenagem de lixiviados entre as camadas, todos realizam de forma parecida criando drenos horizontais que se conectam aos drenos verticais, criando uma malha em toda a área da camada inferior. O ponto principal é a adoção dos drenos de pé de talude, essenciais no controle de possíveis extravasamentos. Como visto, quanto maior a altura do aterro sanitário, maior a possibilidade de ocorrer fluxos horizontais de lixiviados que acabam por alcançar as faces do aterro sanitário.

Quanto as medidas e ações executadas para solução de afloramentos, os seis aterros sanitários adotam medidas parecidas, como procurar drenos próximos ao local do afloramento que possam estar obstruídos e realizar a sua desobstrução. Ou ainda, criar novas linhas de

drenagem horizontais ou na face dos taludes para ter mais caminhos preferências para a drenagem do lixiviado.

Comumente se diz que aterro sanitário é uma obra viva, ou seja, está em constante execução e que necessita de serviços contínuos. A construção de um aterro sanitário inicia na preparação da área selecionada, realizando a terraplanagem e compactação do solo, seguindo para a aplicação dos materiais para a preparação da base do aterro sanitário e daí em diante, segue a construção, camada por camada, implantando drenagem de lixiviados e de águas pluviais.

Portanto, ao longo de toda sua vida útil, o aterro sanitário precisa de investimentos em materiais para a sua construção, além de também ter custos operacionais. A atividade necessita de uma grande quantidade de materiais que são custosos, desde a geomembrana em PEAD até o combustível utilizado para abastecer os equipamentos pesados, assim como, os serviços necessários para a manutenção e controle da atividade. Um dos fatores que é muito importante e precisa ser levado em conta em todo o processo de construção e operação de um aterro sanitário é o financeiro.

Como visto, a quantidade de material agregado mineral, assim como mão de obra e equipamentos, já faz o custo inicial de implantação ser muito alto. O que acaba por ser um limitante na adoção dos leitos drenantes para drenagem de base do aterro sanitário. Em detrimento a ter um sistema mais eficiente de drenagem de lixiviados, se adota um sistema menos eficiente, porém mais barato, como a espinha de peixe.

No caso de tubulações e geomembrana em PEAD, a flutuação do mercado mundial de petróleo, assim como a cotação do dólar podem encarecer ou baratear estes materiais. Ambos são materiais de extrema importância na construção e operação dos aterros sanitários. Considerando que geralmente a implantação da geomembrana PEAD é realizada em grandes áreas, esse custo pode variar de algumas centenas de milhares de reais até mesmo milhões. Por isso que sempre se opta por realizar a construção em etapas.

Ainda sobre o fator financeiro da atividade, a estação de tratamento de lixiviados é um dos pontos da atividade que também necessita um grande aporte de recursos para a sua implantação e operação.

Cunha *et al.* (2021), desenvolveu o Índice de Sustentabilidade Operacional de Aterros Sanitários. Em comparação a outros dois modelos existentes e adotado pelos órgãos ambientais do Estado de São Paulo (Índice de Qualidade de Aterros de Resíduos) e Rio de Janeiro (Índice de Qualidade de Destinação Final de Resíduos), se propõe pontuar e avaliar os aterros sanitários através de indicadores. Foi estabelecido um grupo de indicadores sobre o fator econômico da

atividade, o qual se destaca o indicador de inadimplência, que em aterros sanitários ocorre com certa frequência, por atender entes públicos.

Do ponto de vista do autor, os responsáveis pela operação de aterros sanitários estão a todo tempo lutando contra a natureza e tentando domá-la para atender a legislação ambiental e normas técnicas. Todo o conhecimento técnico e científico existente na bibliografia ajuda os operadores a manterem um rigor operacional, porém nem tudo está sob o controle deles.

Não foi evidenciado se existe um controle de afloramentos de lixiviados, porém são criados registros das soluções adotadas, como um Diário de Obras. Os afloramentos de lixiviados são pontos de fragilidade que podem criar sanções pelos órgãos ambientais, uma vez que em contato com águas pluviais, podem ser encaminhados para drenagens pluviais e chegarem até corpos hídricos ou solo natural.

Como medida de controle da atividade, um indicador estabelecendo se ocorreu em uma berma ou talude, se de forma expedita é possível mensurar a magnitude da ocorrência, se ocorreu próximo a algum dreno, se ocorreu após chuva e a quantidade de afloramentos que é possível observar, poderia auxiliar no melhor entendimento sobre os afloramentos.

Ao observar os locais que ocorrem os afloramentos e a frequência com que ocorrem, possivelmente contribui para o operador entender onde sua drenagem de lixiviados está falhando, ou ainda se existe algum outro tipo de interferência causando isso.

Importante ressaltar que esses aterros sanitários recebem resíduos variados e não apenas aqueles que são Resíduos Sólidos Urbanos ou equiparados. Ocorre que dentre os clientes também estão comércios e serviços, além de indústrias que gerem resíduos classe II. No caso do RSU, como as prefeituras realizam muitas vezes a coleta de entulhos e restos de demolição (RCC) que estão, em grande parte das vezes, misturados aos RSU, estes são dispostos em aterros sanitários. Isso pode acarretar em problemas na drenagem de lixiviados.

A drenagem de lixiviados em aterros sanitários depende de diversos fatores. Até mesmo os modelos computacionais ou racionais dependem de fatores que são de difícil controle, ou ainda de prever a influência deles. Realizar a medição de vazão de lixiviados pode ser um indicativo se o sistema projetado atende as necessidades operacionais, porém, por conta da variabilidade desses diversos fatores, essa comparação entre dados de projeto e de operação, pode ser não tão exata.

Em um estudo avaliando aspectos operacionais e de segurança, Kamiji *et al.* (2019) compilou dados sobre acidentes ocorridos em aterros sanitários do Brasil entre os anos 1991 a 2018, abordando ainda as possíveis causas associadas. Considerando tanto o projeto quanto operação, 70% dos casos teve problemas relacionados a drenagem de lixiviados.

Ou seja, pode tanto ser o sistema de drenagem mal dimensionado ou ainda durante a construção e funcionamento, algo ter acontecido que diminuiu a eficiência do sistema. Nessa situação os diversos fatores já abordados neste trabalho podem contribuir negativamente.

A utilização ou não do geotêxtil como forma de controle de colmatação do meio drenante, ainda não é consenso, como foi visto, na construção do aterro sanitário. Em alguns casos se acredita que o geotêxtil pode colmatar antes mesmo do meio drenante e inutilizar o dreno é envolvido por ele. Em outros casos, o geotêxtil é utilizado como forma de filtrar os lixiviados e criar uma primeira barreira impedindo a colmatação do meio drenante.

Da colmatação do meio drenante assim como do geotêxtil, Junqueira *et al.* (2006), em um estudo sobre a performance de sistemas de drenagem utilizando geotêxtil, demonstrou através de imagens de microscópio processos iniciais de colmatação da areia utilizada como meio drenante assim como do geotêxtil, conforme Figura 43.

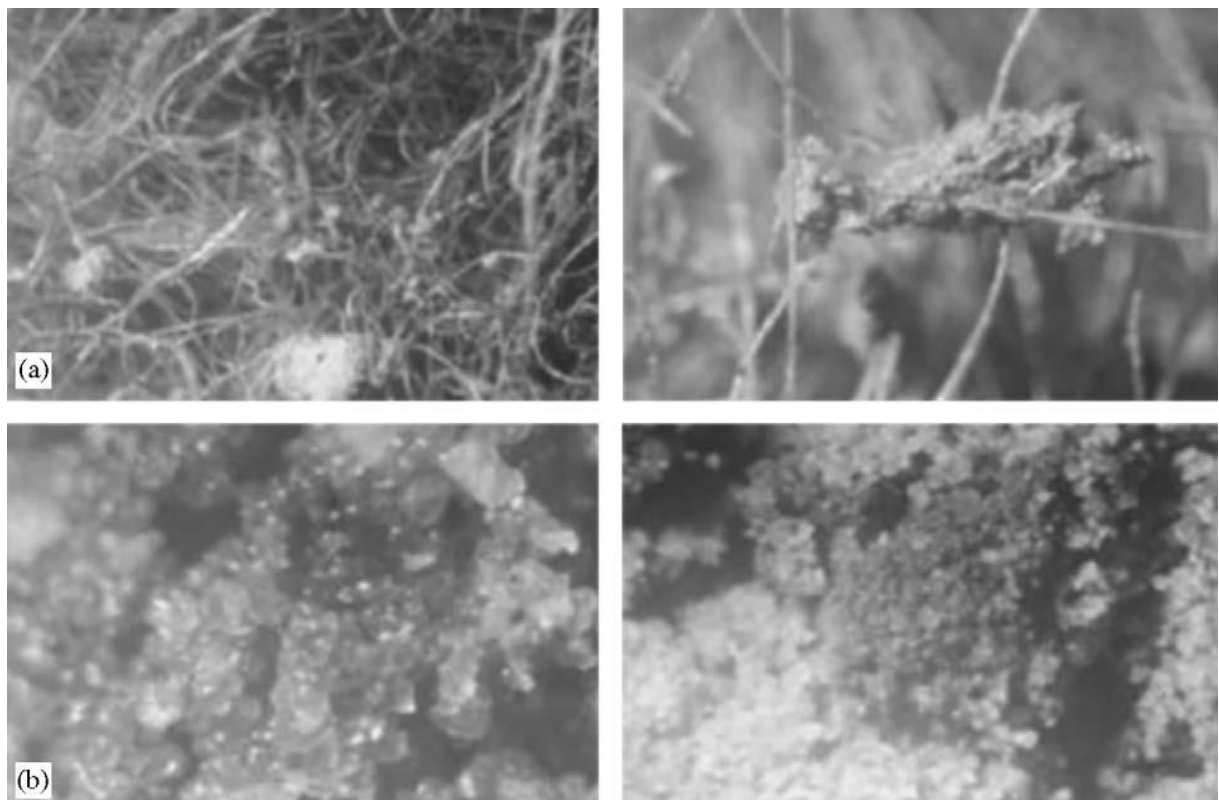


Figura 43 - Imagens de microscópio de amostras de geotêxtil (a) e areia (b) de uma célula experimental de aterro sanitário. Fonte: Junqueira *et al.*, 2006.

Em outro estudo sobre colmatação do geotêxtil, Liu *et al.* (2018) obteve amostrar de lixiviados de estações de transbordo de resíduos. Realizou então um teste de filtração e

observou que o geotêxtil reteve grande parte do material particulado encontrado contido na amostra, conforme Figura 44.

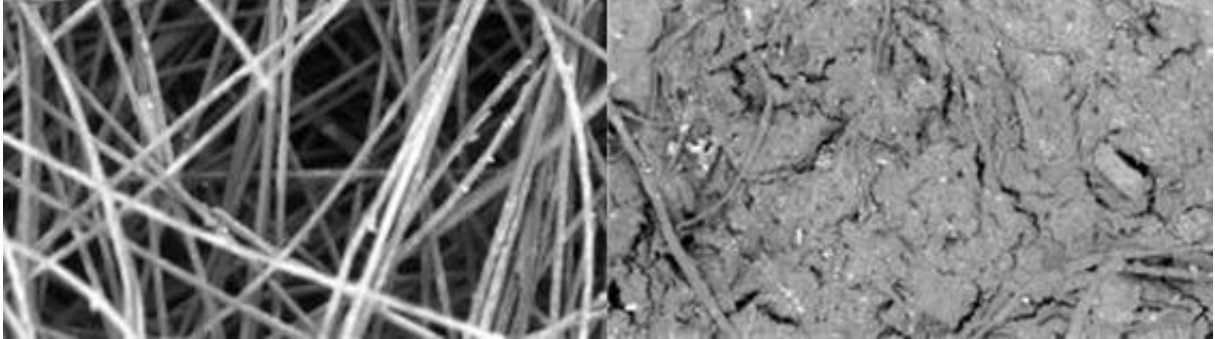


Figura 44 - Geotêxtil antes e após o teste de filtração. Fonte: Liu *et al.*, 2018.

Em ambos os casos foi observado que o material particulado contido em lixiviados pode ocasionar a colmatção do geotêxtil e ainda do meio drenante. Isso, potencialmente, ocasiona os problemas de drenagem de lixiviados que foram observados nos acidentes abordados no estudo de Kamiji *et al.* (2019).

Outro problema de colmatção que pode ocorrer é no caso dos drenos que são construídos com tubulação. A tubulação perfurada pode passar por entupimentos e obstruções devido ao material particulado que é carregado. Pode também ocorrer o desenvolvimento de biofilmes devido a proliferação de microrganismos. Para tentar evitar que isso ocorra, realizar a implantação de meios drenantes compostos de diversos tipos de materiais com granulometrias sucessivamente menores, além do geotêxtil, pode criar um tipo de filtro. Porém ainda assim pode ocorrer a colmatção deste meio.

A colmatção dos drenos diminui ou impede a captação e drenagem dos lixiviados no maciço, causando o aumento da lâmina de lixiviados e, por consequência, da pressão piezométrica.

No entupimento das tubulações, quando existe caixas de passagem/inspeção e/ou poços de visita, é possível adotar medidas visando mitigar problemas de obstrução, porém não é possível garantir que a tubulação volte ao seu estado original. Como os problemas acontecem geralmente anos após o início da operação, potencialmente existirá um impedimento prático de conseguir alcançar ou desenterrar os componentes do sistema de drenagem de lixiviados pra analisar a situação e adotar ações para solução de problemas.

Assim sendo, a implantação de instrumentos de medição da pressão piezométrica, como os piezômetros de câmara simples e dupla, é essencial para a modelagem e determinação do

Fator de Segurança do maciço. Preferencialmente, por conta de o maciço estar sofrendo ação da pressão de gases e lixiviados, o piezômetro de câmara dupla deve ser priorizado. Um estudo geotécnico deve ser desenvolvido para estabelecer os locais e cotas que deverão estar instalados esses instrumentos.

Como visto, apenas dois aterros sanitários deste estudo possuem piezômetros instalados. Em ambos os casos, são piezômetros conforme estabelece a NBR 13.895 (ABNT, 1997), instalados com tubulações ranhuradas que permitem a entrada de líquidos em seu interior ao longo de toda sua extensão. Em aterros sanitários, isso significa que não estará medindo a pressão de líquidos em uma determinada cota. Dessa forma, este poço funciona como um poço de monitoramento de águas subterrâneas, ou neste caso, de monitoramento da lâmina de lixiviados. Este tipo de piezômetro não permite um bom entendimento da situação, pode até mesmo, indicar uma situação que não é a realidade.

Exemplificando, um poço deste, com uma profundidade de 10,00 m, pode ter em sua porção mais inferior uma lâmina de lixiviados com 1,00 m. Porém, até chegar a uma profundidade de 5,00 m, apresentar uma camada muito seca sem nenhum lixiviado escoando por ela. No entanto, bem superficialmente em uma profundidade de 2,00 m, pode ter um bolsão de lixiviados que vai estar infiltrando no interior desta tubulação e acabará por criar um aumento na leitura da lâmina de lixiviados desde o topo.

Esta mesma pressão, que pode ser aferida nos piezômetros, também pode colaborar com a análise dos afloramentos de lixiviados. A tendência é que pressões altas empurrem ou expulsem os líquidos e gases para outras regiões de menor pressão. Considerando a pressão interna do maciço, geralmente a menor pressão é a atmosférica.

Da situação dos seis aterros sanitários, quatro não possuem piezômetros instalados. Os motivos elencados são: 1) a implantação dos piezômetros só deveria ocorrer em áreas finalizadas do aterro sanitário; 2) a implantação de piezômetros seria em locais que ainda irá ocorrer o recebimento de resíduos; 3) a instalação de um piezômetro é muito custosa; 4) a falta de técnicos capacitados para analisar os dados e interpretá-los.

Uma vez que não existe legislação ambiental ou normas técnicas que expressem a forma como estes sistemas devem ser dimensionados e executados, ou ainda diretrizes como deve ser realizado o monitoramento do correto funcionamento, cada responsável por projetar e implantar um aterro sanitário segue uma fórmula diferente, muitas vezes repetindo algo que já foi realizado em uma experiência anterior, considerando ainda o fator financeiro como um limitante.

Dos aterros sanitários que foram objeto de estudo desta pesquisa, até mesmo por se tratar de um assunto que pode ser uma fragilidade operacional e ambiental, a obtenção de dados foi difícil, assim como a ausência de ferramentas e dados para melhor análise das soluções adotadas.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A comparação do sucesso da metodologia de implantação e funcionamento dos drenos de lixiviados não é simples, pois depende de diversos fatores, como a classificação e características dos resíduos aterrados, pluviosidade e topografia local para determinação de contribuição das águas pluviais na geração de lixiviados, fatores operacionais, dentre outros fatores.

Verificou-se também que há dificuldade em analisar em campo as falhas e problemas ocasionados, uma vez que os componentes dos sistemas de drenagem estão aterrados junto dos resíduos, o que dificulta o acesso a esses locais para visualizar e analisar o que está ocorrendo.

Para melhor entendimento e comparação de todas as formas de execução e operação dos sistemas de drenagem de lixiviados e gases, seria necessário a adoção de uma rede de piezômetros e poços para medição de níveis de lixiviados e outros instrumentos de monitoramento geotécnico para nivelar as informações e tratar todas de maneira igual, podendo então realizar uma comparação mais próxima da realidade.

A execução e operação dos sistemas de drenagem de lixiviados apresentaram diferenças em sua execução, havendo diferenças desde a forma que os drenos são implantados na base dos aterros sanitários, incluindo diferenças nos materiais adotados como a utilização ou não do geotêxtil, e ainda na forma que os drenos são construídos.

A partir das visitas e relatos dos operadores, assim como registros fotográficos, foi possível observar potenciais problemas causados por deficiências no sistema de drenagem de lixiviados, como os afloramentos de lixiviados. No entanto, todos os seis aterros sanitários apresentaram medidas e ações para solucionar estes problemas que são comuns entre si.

Foi possível observar também uma deficiência no monitoramento geotécnico em relação ao controle de pressões internas do maciço de resíduos em todos os seis aterros sanitários. Quatro dos aterros sanitários não possuem nenhum tipo de piezômetro instalado e os dois que possuem, são apenas para medição do nível da lâmina de lixiviados, não adequados para realizar a leitura de pressões internas do maciço.

No entanto, é possível aferir que todos apresentam condições adequadas de operação, demonstrando ainda que as soluções adotadas são suficientes para solução de problemas. Porém não é possível afirmar que a drenagem de lixiviados terá uma vida útil de serviço que atenda toda a fase de operação e pós-encerramento dos aterros sanitários.

A seguir, sugestões para trabalhos futuros que pretendam realizar uma comparação entre os modelos de execução da drenagem de lixiviados:

- Realizar a construção de uma célula experimental de um aterro sanitário para dividi-la em seções, adotando diferentes configurações da drenagem de lixiviados;
- Caracterização gravimétrica dos resíduos que serão dispostos nesta célula experimental para garantia de receber resíduos com características iguais em cada seção;
- Controle da geração de lixiviados por seção para comparação dos resultados e confrontá-los com dados de modelagem matemática;
- Construção de poços de visita e caixas de passagem para possível visualização da situação nos drenos de lixiviados;
- Realizar a escavação dos resíduos para expor os drenos após finalização do estudo experimental para análise da situação de colmatação de geotêxteis e meios drenantes.

REFERÊNCIAS

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021**. São Paulo, 2021. Disponível em: < <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/> > Acesso em maio de 2022.

ABREU, A. E. S. **Avaliação geofísica e resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos de diferentes idades**. 2015. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8.419/1992: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004/2004: Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13.292/1995: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1995.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13.895/1997: Construção de poços de monitoramento e amostragem / Procedimento**. Rio de Janeiro, 1997.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13.896/1997: Aterros de resíduos não perigosos – Critério para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro, 1997.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14.454/2000: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável**. Rio de Janeiro, 2000.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.849/2010: Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento**. Rio de Janeiro, 2010.

ALFAIA, R. G. S. M.; COSTA, A. M.; CAMPOS, J. C. **Municipal solid waste in Brazil: A review**. Waste Management & Research, v.35, n.12, p.1195-1209, 2017.

BRASIL. CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA N° 308 de 21 de março de 2002 - Licenciamento Ambiental de sistemas de disposição final dos resíduos sólidos urbanos gerados em municípios de pequeno porte**. Brasília, 2002.

BRASIL. **Lei n° 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e dá outras providências**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo. Brasília, 2010.

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo. Brasília, 2020.

BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2019.** Brasília: SNS/MDR, 2020.

BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos. Visão Geral Ano de Referência 2020.** 2021. Brasília, 2021.

BANCO MUNDIAL. KAZA *et al.* **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050.** Urban Development Series. Washington, 2019.

BORGATTO, A. V. A.; MAHLER, C. F.; MÜNNICH, K.; WEBLER, A. D. **Influence of the Fibre Component of Soft Plastic on Shear Strength Parameters of Pre-Treated Municipal Solid Waste.** Soils and Rocks, São Paulo, 37(2): 151-157, May-August, 2014.

BOSCOV, M. E. G.; ABREU, R.C. **Aterros sanitários previsão de desempenho x comportamento real.** Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica / Núcleo Regional de São Paulo. São Paulo: ABMS/NRSP, 2000.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental.** 2008. Oficina de Textos. 248p. São Paulo, 2008.

CARVALHO, M. DE F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos.** 1999. (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, 1999.

CASAGRANDE, A.; FADUM, R. E. **Notes on soil testing for engineering purposes.** Harvard soil mechanics series, 8. Harvard University, Graduate School of Engineering, 1940. 74p. Massachusetts, 1940.

CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação.** 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2007.

CATTERPILAR. **Manual de gerenciamento de resíduos (ref. APDS0227).** Washington: Caterpillar, 2001.

CETESB. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Aterro Sanitário.** Disponível em: < <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/aterro-sanitario/> > Acesso em agosto de 2020.

COMLURB. **Caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares: influências do distanciamento social imposto pela pandemia de coronavírus.** 2020. - Gerência de Pesquisa e Controle de Vetores (TGP/DLU). Rio de Janeiro, 2020.

CONDE, A. L. F. M. **Composição física dos resíduos sólidos urbanos coletados em diferentes municípios do estado do Rio de Janeiro.** Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2021.

CUNHA, C. E. S. C. P.; RITTER, E. FERREIRA, J. A.; SOARES, R. **Análise do Índice de Sustentabilidade Operacional de Aterros Sanitários (ISOAS) nos Aterros Sanitários de Seropédica e São Gonçalo, no ERJ, no Ano de 2019.** 2021. 14º Seminário Nacional de Resíduos Sólidos. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária. Rio de Janeiro, 2021.

DARCY, H. **Les fontaines publiques de la ville de Dijon: Exposition et application des principes a suivre et des formules a employer dans les questions de distribution d'eau; ouvrage terminé par un appendice relatif aux fournitures d'eau de plusieurs villes au filtrage des eaux et a la fabrication des tuyaux de fonte, de plomb, de tole et de bitume.** 1856. V. Dalmont, 1856.

DENARDIN, G. P. S. **Compressibilidade de resíduos sólidos urbanos devido aos processos de biodegradação em um aterro sanitário.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul, 2019.

DOMINONI, V. M. B. **Análise dos métodos de estimativa de geração de lixiviado por resíduos sólidos urbanos no aterro sanitário de Nova Iguaçu.** 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2020.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Clima.** Disponível em: < <https://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/clima.htm> > Acesso em maio de 2022.

GIROUD, J. P. **Leakage Control using Geomembrane Liners.** 2016. *Soils and Rocks*, 39(3): 213-235. São Paulo, 2016.

HAMADA, J.; MANCINI, S. **Disciplina da graduação em engenharia ambiental: Chorume e biogás de aterros sanitários.** 2012. UNESP. Disponível em: <<http://www.sorocaba.unesp.br/Home/Graduacao/EngenhariaAmbiental/SandroD.Mancini/chorume-biogas.pdf>>. Acesso em agosto de 2020.

IKEGUCHI, T. **Progress in sanitary landfill technology and regulations in Japan: A review.** *Waste Management & Research*, v. 12. 1994.

INEA. Instituto Estadual do Ambiente. **O licenciamento ambiental de uma central de tratamento de resíduos: caso da CTR Seropédica.** 2007. *Revista Ineana*, v.5. 2007.

JUNQUERIA, F. F.; SILVA, A. R. L.; PALMEIRA, E. M. **Performance of Drainage Systems Incorporating Geosynthetics and Their Effect on Leachate Properties.** 2006. *Geotextiles and Geomembranes* 24 (2006), 311–324. 2006.

KAMIJI, T. S. M. M.; OLIVEIRA, F. J. P. de; **Evaluation of Operational and Safety Aspects of Brazilian Sanitary Landfills.** 2019. 17th International Waste Management and Landfill Symposium. Itália, 2019.

LIU, Y.; SUN, W.; DU, B.; LIU, J. **The Physical Clogging of the Landfill Leachate Collection System in China: Based on Filtration Test and Numerical Modelling.** Int. J. Environ. Res. Public Health 2018, 15, 318. 2018.

MCISAAC, R.; ROWE, K. **Clogging of Gravel Drainage Layers Permeated with Landfill Leachate.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - J GEOTECH GEOENVIRON ENG, 2007, 133.

MENEZES, R. O.; CASTRO, S. R.; SILVA, J. B. G.; TEIXEIRA, G. P.; SILVA, M. A. M. **Análise estatística da caracterização gravimétrica de resíduos sólidos domiciliares: estudo de caso do município de Juiz de Fora, Minas Gerais.** Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, volume 24, número 2, de março/abril, 2019.

MOTTA, E. DE Q. **Avaliação da resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos com codisposição de lodo de tratamento de esgoto através de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões.** 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco. Pernambuco, 2011.

NUCASE. Núcleo Sudeste de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental. **Resíduos sólidos: projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários.** 2008. Ministério das Cidades – Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Belo Horizonte, 2008.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. **World Population Prospects 2019: Highlights.** Nova Iorque, 2019.

PEREIRA, A. **Desenvolvimento de um indicador para avaliação de desempenho de aterros de resíduos sólidos urbanos.** 2005. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

RIBEIRO, D. F. **Avaliação dos aspectos estruturais e operacionais em cinco aterros sanitários, localizados nos Estados do Rio de Janeiro e São Paulo.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.

SAVAGE, G. M.; DIAZ, L. F.; GOLUEKE, C. G.; MARTONE, C., HAM, R. K. **Guidance for landfilling waste in economically developing countries.** Washington: USEPA, (Report EPA/600/R-98-040), 1998.

TCHOBANOGLIOUS, G., KREITH, F. **Handbook of solid waste management: Second Edition.** McGrall-Hill, inc. 834p. California, 2002.

TRAPANI, D.; BELLA, G.; MANNINA, G.; NICOSIA, S.; VIVIANI, G. **Influence of the Height of Municipal Solid Waste Landfill on the Formation of Perched Leachate Zones.** Journal of Environmental Engineering, 2015, 141(8). 2015.

VERGARA, S. E.; TCHOBANOGLIOUS, G. **Municipal Solid Waste and the Environment: A Global Perspective.** 2012. Annual Review of Environment and Resources. 2012. 37:277–309. 2012.

YU, Y.; ROWE, K. **Effect of grain size on service life of MSW landfill drainage system.** Can. Geotech. J. 50: 1-14. 2013.