

**BARBARA SOPHIA PARDINHO**  
**PIETRA ROQUE DOS SANTOS**

**Análise das técnicas construtivas e de operação de aterros**  
**em atendimento às normas brasileiras**

**Barbara Sophia Pardinho**  
**Pietra Roque dos Santos**

**Análise das técnicas construtivas e de operação de aterros  
em atendimento às normas brasileiras**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Isabel Cristina de Barros Trannin

Guaratinguetá/SP  
2021

P226a Pardino, Bárbara Sophia  
Análise das técnicas construtivas e de operação de aterros em atendimento às normas brasileiras / Bárbara Sophia Pardino; Pietra Roque dos Santos– Guaratinguetá, 2021.  
102 f. : il.  
Bibliografia : f. 90-96

Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021.  
Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Isabel Cristina de Barros Trannin

1. Construção sustentável. 2. Saneamento. 3. Sustentabilidade.  
4. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). I.Título.

CDU 69


Luciana Máximo

Bibliotecária-CRB-8/3595

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
**CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**


**BARBARA SOPHIA PARDINHO**  
**PIETRA ROQUE DOS SANTOS**

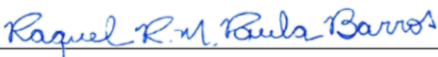
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
“GRADUADO EM ENGENHARIA CIVIL”  
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

  
Profª Drª Isabel Cristina de Barros Trannin  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Profª Drª Isabel Cristina de Barros Trannin  
Orientadora/UNESP-FEG

  
Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza  
UNESP-FEG

  
Profª Drª Raquel Regina Martini Paula Barros  
UNESP-FEG

GUARATINGUETÁ – SP

2021

## **DADOS CURRICULARES**

### **BARBARA SOPHIA PARDINHO**

**NASCIMENTO** 16.09.1996 – Osasco/SP

**FILIAÇÃO** Maria Aparecida da Rocha

**2015/2020** Curso de Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Estadual Paulista – “Júlio de Mesquita Filho”, Campus  
de Guaratinguetá

**2018/2019** Master II em Engenharia Civil  
Université de Formation et de Recherche Mathématique,  
Informatique, Mécanique et Automatique – “Université de Lorraine  
UFR MIM”, Campus de Metz

### **PIETRA ROQUE DOS SANTOS**

**NASCIMENTO** 07.05.1997 – São Paulo/SP

**FILIAÇÃO** Esdon Clemente dos Santos  
Rosimeire Roque Silva Santos

**2015/2020** Curso de Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Estadual Paulista – “Júlio de Mesquita Filho”, Campus  
de Guaratinguetá

Dedicamos este trabalho às nossas famílias,  
que sempre nos apoiaram e se esforçaram  
para que tivéssemos a oportunidade de estar  
onde eles não puderam.

## **AGRADECIMENTOS**

Às nossas famílias que fizeram de nós as pessoas que somos hoje, que nos incentivaram a seguir nossos objetivos e nos apoiaram para que nunca desistíssemos de realizá-los.

Aos nossos amigos que se mantiveram presentes em todos os momentos, bons e ruins, de nossa caminhada pela graduação.

À Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Isabel Cristina de Barros Trannin, por sua atenção, dedicação e apoio não só em nossas vidas acadêmicas, mas também pessoal.

Agradecemos a todos os professores e funcionários da Unesp, campus de Guaratinguetá, que contribuíram para a nossa formação profissional e pessoal.

A todos que participaram dessa jornada, deixamos aqui o nosso muito obrigada.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - número do processo 88887.192678/2018-00.001.



“[Eu] pensava que nós seguíamos caminhos já feitos, mas parece que não os há. O nosso ir faz o caminho”;

C. S. Lewis

## RESUMO

No Brasil, a Lei 12305/2010 instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que além de estabelecer diretrizes à gestão de resíduos, determinou como meta a extinção de lixões e a disposição final de rejeitos em aterros. A técnica do aterramento permite um controle mais seguro do processo de decomposição dos resíduos, apresentando uma boa relação custo-benefício. No entanto, as reações químicas e biológicas que ocorrem durante a decomposição dos rejeitos, geram efluentes líquidos (chorume) e gasosos (biogás). Para que estes efluentes não gerem passivos ambientais é necessário o atendimento às normas construtivas estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo analisar comparativamente os requisitos normativos para projeto, construção e operação dos aterros industriais, sanitários e de inertes. Nesta análise foram considerados os métodos construtivos de rampa, de área e de vala ou trincheira e os geossintéticos aplicados nas diferentes fases de construção e de operação dos aterros. Também foram dimensionados dois projetos, um de aterro sanitário e outro de aterro de inertes, considerando as condições de um município de 20.000 habitantes. Da elaboração destes projetos, foi possível concluir que, além das características topográficas, geológicas, pedológicas, hídricas e climáticas do local, é indispensável considerar a geração per capita de resíduos e a disponibilidade de recursos, para a seleção do modelo construtivo adequado, visando garantir maior tempo de vida útil do aterro. Quanto à aplicação de geossintéticos em aterros, destacam-se a geomembrana de PEAD, empregada na etapa de impermeabilização do leito das células, e a geomanta, no fechamento das células, por apresentar elevada estabilidade e resistência aos raios ultravioletas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Saneamento ambiental. Técnicas construtivas. Gestão de resíduos. Geossintéticos. Aterros. Sustentabilidade.

## **ABSTRACT**

In Brazil, Law 12305/2010 instituted the National Solid Waste Policy, which in addition to establishing guidelines for waste management, set the goal of extinction of dumping ground and the final disposal of waste in landfills. The grounding technique allows a safer control of the waste decomposition process, presenting a good cost-benefit ratio. However, the chemical and biological reactions that occur during the decomposition of the tailings, generate liquid (leachate) and gaseous (biogas) effluents. So that these effluents do not generate environmental liabilities, it is necessary to comply with the construction standards established by the Brazilian Association of Technical Standards - ABNT. In this context, this capstone project aimed to comparatively analyze the normative requirements for the design, construction and operation of industrial, sanitary and construction/demolition landfills. In this analysis, the construction methods of ramp, area and ditch or trench and geosynthetics applied in the different phases of construction and operation of the landfills were considered. Two projects were also designed, one for sanitary landfill and the other for construction and demolition landfill, considering the conditions of a municipality of 20,000 inhabitants. From the elaboration of these projects, it was possible to conclude that, in addition to the topographic, geological, pedological, water and climatic characteristics of the site, it is essential to consider the per capita generation of waste and the availability of resources, for the selection of the appropriate construction model, in order to guarantee longer life of the landfill. As for the application of geosynthetics in landfills, the highlights are the HDPE geomembrane, used in the cell bed waterproofing stage, and the geomanta, in the closing of the cells, for presenting high stability and resistance to ultraviolet rays.

**KEYWORDS:** Environmental sanitation. Constructive techniques. Waste management. Geosynthetics. Landfills. Sustainability .

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Geotêxtil não tecido .....	37
Figura 2 - Geotêxtil tecido.....	38
Figura 3 - Geogrelha.....	38
Figura 4 - Georrede.....	39
Figura 5 - Geomembrana rugosa .....	39
Figura 6 - Geomembrana lisa .....	40
Figura 7 - Biomanta.....	40
Figura 8 - Geocomposto Bentonítico – GLC.....	41
Figura 9 - Geocélulas.....	41
Figura 10 - Geotubo.....	42
Figura 11 - Configuração de uma camada de proteção de fundo de aterro sanitário .....	44
Figura 12 - Representação esquemática sistema de drenagem modelo espinha de peixe ....	47
Figura 13 - Esquema de uma estação de tratamento de chorume com lagoas aeróbias .....	48
Figura 14 - Exemplo de instalação e configuração de um sistema de drenagem de gás .....	50
Figura 15 - Disposição final de resíduos em aterro com o método construtivo de rampa ...	55
Figura 16 - Disposição final de resíduos em aterro com o método construtivo de área.....	56
Figura 17 - Disposição final de resíduos em aterro com o método construtivo de valas .....	56
Figura 18 - Distribuição de camadas no perfil de uma vala do aterro sanitário projetado...	74
Figura 19 - Distribuição de camadas no perfil de uma vala do aterro de inertes projetado.	81

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Funções de geossintéticos em aterros .....	43
Quadro 2 – Critérios para priorização de áreas de instalação de aterros em geral .....	52
Quadro 3 – Parâmetros a serem analisados na seleção do método construtivo de um aterro .....	58
Quadro 4 – Sistema operacional de aterros em diferentes métodos construtivos .....	61
Quadro 5 – Geossintéticos aplicados no aterro sanitário.....	64
Quadro 6 – Aplicações de geossintéticos em aterros de inertes .....	65
Quadro 7 – Análise comparativa dos critérios e necessidades dos projetos de aterros sanitários e de inertes no sistema construtivo de valas.....	82
Quadro 8 – Principais parâmetros considerados na estimativa de custos de aterros .....	833

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critérios para dispensar a impermeabilização de fundo de aterro sanitário .....	45
Tabela 2 – Faixa de variação da composição de chorumes em aterros sanitários.....	46
Tabela 3 – Instruções para avaliar necessidade de sistema de drenagem de gases em aterros .....	51
Tabela 4 – Critérios para seleção da área para instalação de aterros sanitários .....	54
Tabela 5 – Critérios de avaliação das velocidades de deslocamento em aterro sanitário ....	71
Tabela 6 – Volume aterrado e área ocupada pelo aterro sanitário em 25 anos de vida útil .....	73
Tabela 7 – Volume de resíduos aterrado anualmente e acumulado a cada dois anos e área ocupada pelo aterro de inertes em 25 anos de vida útil.....	79

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
LI	Licença de Instalação
LO	Licença de Operação
LP	Licença Prévia
NBR	Norma Brasileira
NF	Nível Freático
NP	Norma Portuguesa
PEAD	Polietileno de alta densidade
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PS	Poliestireno
RCC	Resíduos de Construção Civil
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
RS	Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	18
2.1	PANORAMA BRASILEIRO DE GESTÃO DE RESÍDUOS.....	18
<b>2.1.1</b>	<b>Política Nacional de resíduos Sólidos</b> .....	18
<b>2.1.2</b>	<b>Classificação dos resíduos sólidos – NBR /10.004/2004</b> .....	21
<b>2.1.3</b>	<b>Amostragem de Resíduos Sólidos - NBR 10.007/2004</b> .....	22
2.2	DESTINAÇÃO E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS .....	23
2.3	NORMAS PARA PROJETO, CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO DE ATERROS	25
<b>2.3.1</b>	<b>Aterro de Resíduos Perigosos</b> .....	26
<b>2.3.2</b>	<b>Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos</b> .....	29
<b>2.3.3</b>	<b>Aterros de Inertes e Resíduos de Construção Civil</b> .....	32
2.4	APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS EM ATERROS .....	34
2.5	MONITORAMENTO E TRATAMENTO DE EFLUENTES EM ATERROS ...	45
2.6	CRITÉRIOS PARA PRIORIZAÇÃO DE ÁREAS DE INSTALAÇÃO DE ATERROS.....	52
2.7	MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE ATERROS.....	54
<b>2.7.1</b>	<b>Método construtivo de Rampa</b> .....	54
<b>2.7.2</b>	<b>Método construtivo de Área</b> .....	55
<b>2.7.3</b>	<b>Método construtivo de Trincheira/Vala</b> .....	56
2.7.3.1	Procedimentos gerais de operação .....	57
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	59
3.1	METODOLOGIA .....	59
3.2	DIMENSIONAMENTO DAS ÁREAS DOS ATERROS .....	62
<b>3.2.1</b>	<b>Projeto de aterro sanitário de pequeno porte</b> .....	62
<b>3.2.2</b>	<b>Projeto de aterro de inertes</b> .....	64
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	66
4.1	PROJETO DE ATERRO SANITÁRIO DE PEQUENO PORTE .....	66
<b>4.1.1</b>	<b>Sequência de abertura e fechamento das trincheiras</b> .....	66
<b>4.1.2</b>	<b>Procedimento de compactação</b> .....	67
<b>4.1.3</b>	<b>Camada de proteção: impermeabilização de fundo, reforço, filtração e separação</b> .....	68
<b>4.1.4</b>	<b>Sistemas de drenagem</b> .....	69



<b>4.1.5</b>	<b>Camada de cobertura.....</b>	<b>70</b>
<b>4.1.6</b>	<b>Monitoramento e análise de estabilidade .....</b>	<b>70</b>
<b>4.1.7</b>	<b>Encerramento do aterro .....</b>	<b>71</b>
<b>4.1.8</b>	<b>Dados quantitativos:.....</b>	<b>72</b>
<b>4.1.9</b>	<b>Croqui da distribuição de camadas no aterro sanitário .....</b>	<b>73</b>
<b>4.2</b>	<b>PROJETO DE ATERRO DE INERTES.....</b>	<b>75</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Recebimento e triagem dos resíduos.....</b>	<b>75</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Camada de proteção: reforço e filtração.....</b>	<b>76</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Sistemas de drenagem e monitoramento.....</b>	<b>76</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Camada de cobertura.....</b>	<b>77</b>
<b>4.2.5</b>	<b>Vida útil do aterro .....</b>	<b>77</b>
<b>4.2.6</b>	<b>Dados quantitativos.....</b>	<b>77</b>
<b>4.2.7</b>	<b>Croqui da distribuição de camadas no aterro de inertes.....</b>	<b>80</b>
<b>4.2.8</b>	<b>Licenciamento Ambiental.....</b>	<b>83</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>87</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>88</b>
	<b>APÊNDICE A – DIMENSIONAMENTO ATERRO SANITÁRIO DE PEQUENO PORTE .....</b>	<b>95</b>
	<b>APÊNDICE B – DIMENSIONAMENTO ATERRO SANITÁRIO DE PEQUENO PORTE .....</b>	<b>98</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A destinação adequada dos resíduos ainda é um tema muito discutido no Brasil, embora há dez anos, a Lei Federal 12.305/2010, tenha instituído a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que reúne o conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotados pelo Governo Federal, isoladamente ou em regime de cooperação com Estados, Distrito Federal, Municípios ou particulares, com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos, tendo entre as metas, a eliminação e a recuperação de lixões, associadas à inclusão social e à emancipação econômica de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis (BRASIL, 2010).

De acordo com a PNRS a destinação final ambientalmente adequada de resíduos inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sistema Nacional do Meio Ambiente, entre estas, a disposição final ordenada de rejeitos em aterros, observando as normas operacionais específicas para cada destinação, para evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e para minimizar os impactos ambientais adversos. Portanto, para que a destinação dos resíduos seja realizada de forma adequada, é necessário que estes sejam segregados, acondicionados, transportados e destinados, atendendo os requisitos estabelecidos pela NBR 10.004/2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que classifica os resíduos de acordo com a presença de substâncias perigosas (ABNT, 2004). Neste aspecto, os aterros devem atender os critérios para localização, projeto, construção, operação e encerramento, estabelecidos pelas normas da ABNT, como a NBR 10.157/1987 para aterros de resíduos perigosos; a NBR 13.896/1997 para aterros de resíduos não perigosos; a NBR 15.849/2010 para aterros sanitários de pequeno porte e a NBR 15.113/2004 para aterros de resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes.

O aterramento tem se mostrado uma das técnicas mais eficientes e seguras de destinação de resíduos sólidos, pois permite controlar o processo de decomposição dos resíduos e, quase sempre, apresenta a melhor relação custo-benefício. Neste contexto, este trabalho de graduação pretende gerar informações e uma análise crítica sobre as necessidades construtivas dos diferentes tipos de aterros para atendimento às normas brasileiras. Além disso, esta análise complementarará o estágio realizado em uma empresa de consultoria ambiental, onde foi possível obter conhecimento sobre os processos de concepção, projeto, quantificação, orçamento e monitoramento de aterros.

### 1.1 OBJETIVOS

Analisar os critérios para localização, projeto, construção, operação e encerramento dos diferentes tipos de aterros, visando o atendimento às normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

### **1.1.1 Objetivos específicos**

- Fundamentar técnica e cientificamente o trabalho por meio da revisão bibliográfica de artigos técnicos e científicos sobre a técnica de aterramento como estratégia de disposição de rejeitos, e da consulta às normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas, para a compreensão dos requisitos estabelecidos para projeto, construção e operação dos diferentes tipos de aterros.

- Avaliar as exigências normativas para projeto, construção e operação de aterros industriais, utilizados para disposição de resíduos perigosos – Classe I; aterros sanitários para disposição de resíduos sólidos urbanos; aterros de resíduos não perigosos e não inertes e de aterros de resíduos inertes, que incluem aos resíduos de Classe A da construção civil.

- Analisar o cenário atual de gestão de resíduos no Brasil, considerando os entraves e dificuldades para o cumprimento da Lei Federal 12.305/2010, destacando a importância das simplificações propostas pela NBR 15.849/2010 - que estabelece diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento de aterros sanitários de pequeno porte – contendo adaptações das normas precedentes para a realidade da maioria dos municípios brasileiros, incentivando assim a erradicação dos lixões e a aplicação de técnicas sustentáveis.

- Apresentar uma análise comparativa entre as técnicas construtivas de aterros sanitários e aterro de inertes, enfatizando o uso de geossintéticos e suas funções nestes tipos de aterro.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

A revisão bibliográfica abordou o cenário brasileiro de gestão de resíduos, destacando a importância da Lei Federal 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos Urbanos (PNRS), a NBR 10.004/2004, que classifica os resíduos quanto à periculosidade e as demais normas de Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), para localização, projeto, construção, operação e encerramento dos diferentes tipos de aterros e suas funções, considerando os tipos de rejeitos dispostos e os geossintéticos aplicados em diferentes etapas de funcionamento dos aterros.

### **2.1 PANORAMA BRASILEIRO DE GESTÃO DE RESÍDUOS**

#### **2.1.1 Política Nacional de resíduos Sólidos**

O processo de expansão das cidades no Brasil se deu de forma expressiva na segunda metade do século XX e foi marcado pela ausência de políticas integradas de desenvolvimento em infraestrutura urbana (IPEA/INFURB, 1998). Este processo de urbanização de forma desordenada resultou na periferação do crescimento metropolitano, acompanhado de um aumento significativo nos índices de favelização e precariedade dos assentamentos habitacionais para a população de baixa renda, sendo comum as ocupações irregulares em áreas protegidas e sobre solos frágeis (GARSON, 2009).

Um dos grandes reflexos da urbanização desordenada das cidades e do modelo de consumo atual é a geração de grandes volumes de resíduos e rejeitos. Segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos, elaborado pela Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública (ABRELPE, 2019), no ano de 2018 foram gerados no Brasil cerca de 79 milhões de toneladas de resíduos, dos quais 92% foram coletados, e destes, somente 59,5% foram destinados aos aterros sanitários. Com base nestas informações, percebe-se que a disposição final inadequada ainda predomina no cenário de gestão de resíduos nacional, o que implica em graves riscos de contaminação da população local e de degradação do meio ambiente.

De acordo com Pimenteira (2011), uma das problemáticas da ausência de tratamento dos rejeitos gerados e de sua disposição final inadequada, como no caso dos lixões a céu aberto, ocorre principalmente, devido à percolação do chorume - principal subproduto da decomposição da fração orgânica dos rejeitos - que acarreta na poluição dos solos e pode lixiviar e contaminar as águas subterrâneas.

Além disso, a gestão ineficiente dos resíduos sólidos urbanos (RSU) promove a liberação de poluentes atmosféricos, gerando impactos negativos na qualidade do ar e, conseqüentemente, na saúde pública. De acordo com Gouveia (2012), a decomposição anaeróbia da fração orgânica dos resíduos é responsável pela produção de gases de efeito estufa (GEE), em especial, de metano (CH<sub>4</sub>), considerado um dos principais fomentadores do aquecimento global. Segundo Valle (2009), outro fator ligado à poluição atmosférica é a queima dos materiais descartados em terrenos baldios sem nenhum tratamento, devido sobretudo à falta de conscientização da comunidade. Além disso, a perda da vegetação devido às queimadas, expõe o solo às ações erosivas, com conseqüentes danos ambientais (MORGADO, 2006).

Neste contexto, a Lei Federal nº 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, representou um marco para a gestão de RSU no Brasil, fixando metas para a erradicação de lixões até o mês de agosto de 2014, definindo a integridade da saúde humana e a sustentabilidade, como princípios norteadores do manejo integrado e ambientalmente adequado dos RSU (BRASIL, 2010). Portanto, o objetivo estratégico da PNRS foi encerrar as atividades dos lixões e destinar o mínimo possível de rejeitos para os aterros sanitários, de forma a reduzir o volume de resíduos sólidos à menor fração possível e em seguida, recuperar as partes que apresentem um potencial energético aproveitáveis, dispondo nos aterros somente os rejeitos (LAVNITCKI; BAUM; BECEGATO, 2018). Tal medida visa a mitigação dos impactos ambientais e incentiva a reutilização e a reciclagem, estimulando novos padrões de práticas sustentáveis.

A Lei nº 12.305/2010 define a gestão integrada de resíduos sólidos como:

[...] o conjunto de ações voltadas para solucionar o problema dos resíduos sólidos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável [...]

Neste trecho da lei, destaca-se a amplitude e a complexidade da temática de manejo dos resíduos, visto que transcende a esfera da saúde pública, por possuir valor social, econômico e ambiental (BAPTISTA, 2014). Associado à necessidade de políticas intersetoriais e multidisciplinares, ressalta-se a dificuldade referente à efetiva aplicação das medidas estabelecidas pela PNRS pelo poder público, ligada sobretudo, ao investimento insuficiente em infraestrutura urbana, à baixa disponibilidade orçamentária para o setor de

saneamento básico e à incapacidade de gerenciamento de muitos municípios brasileiros (HEBER; SILVA, 2014).

Para superar essas deficiências estruturais, considerando que grande parte dos municípios não possuem os recursos financeiros e técnicos imprescindíveis para a implantação de infraestruturas adequadas de disposição final de RSU, cabe mencionar a relevância da gestão intermunicipal e dos consórcios de saneamento (MORAES, 2012). Estes consórcios podem ser constituídos exclusivamente para compartilhamento de aterro sanitário ou visando proporcionar atividades mais amplas para o desenvolvimento regional, tangendo outros setores do saneamento básico. Para Britto (2014), esse modelo de cooperação interinstitucional tem sido fortalecido nos últimos anos e, graças à implementação da lei, ganha personalidade jurídica e força institucional às instâncias de cooperação intermunicipal.

Segundo Moraes (2012), esse modelo cooperativo agrega uma série de vantagens aos municípios na gestão de RSU, permitindo um maior controle sobre o tratamento e a disposição final e fortalecendo o potencial de aproveitamento dos resíduos, pois amplia a capacidade de coleta, triagem e, conseqüentemente, a reciclagem dos materiais. Além disso, incentiva a organização de catadores em cooperativas, promovendo melhorias nas condições de trabalho e de vida.

Entretanto, ressaltam-se diversos entraves relacionados à implantação dos consórcios públicos de RSU, tanto pela carência de profissionais capacitados e habilitados, quanto pela falta de apoio técnico e administrativo dos municípios, que assistem à uma significativa instabilidade entre os diferentes mandatos dos governos municipais (MILANEZ *et al.*, 2012). De maneira geral, a gestão integrada dos RSU, apesar de ser um objetivo comum e institucionalmente desejada, ainda apresenta muitos desafios (BRITTO, 2014).

Com base na pesquisa nacional de resíduos sólidos, publicada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019), apesar dos avanços propostos pela implantação da PNRS, a média nacional de disposição dos resíduos em aterros sanitários ainda é bastante inferior à dos países na mesma faixa de renda, onde 70% recebe a destinação final adequada. Atualmente, cerca de 8% dos rejeitos produzidos no Brasil (equivalente a 6,3 milhões de toneladas) não é sequer coletado e cerca de 40% do total coletado é descarregado em vazadouros a céu aberto ou em áreas que não apresentam as condições mínimas de segurança exigíveis para garantir a integridade do meio e da população local, revelando a precariedade crônica do setor, tendo em vista que esta é a realidade de mais de 50% dos municípios do país (ABRELPE, 2019).

Para enfrentar esses entraves, uma das diretrizes adotadas pela lei é o conceito de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e a logística reversa, que inclui os fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos (LEITE, 2009). De acordo com a PNRS a logística reversa é definida como:

[...] instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada.

Desta forma, tal medida visa incentivar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, de forma a aproveitá-los nos ciclos produtivos (se possível) e assegurar a deposição final ambientalmente adequada (GUARNIERI, 2005). Segundo Barros *et al.* (2018), o engajamento das organizações em relação às questões ambientais, que colocam em prática a logística reversa e seguem a legislação vigente, trazem vantagens competitivas no mercado. No cenário atual de busca pelo desenvolvimento sustentável, o comprometimento das organizações com as causas ambientais proporciona ganho de credibilidade e visibilidade por parte dos consumidores (BARBOSA, 2018).

### **2.1.2 Classificação dos resíduos sólidos – NBR /10.004/2004**

A classificação dos resíduos sólidos é feita com base na identificação da atividade que lhes deu origem e da matéria que os constituem, que podem, por sua vez, oferecer riscos potenciais à saúde pública e ao meio ambiente. Essa classificação permite estabelecer critérios de gestão adequada, com a possibilidade de reutilização, reciclagem, geração de energia ou na disposição final em aterros. A norma NBR 10.004/2004 da ABNT, classifica os resíduos sólidos quanto à periculosidade em:

**Resíduos Classe I – Perigosos:** são aqueles que apresentam periculosidade ou características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade. Pertencem a esta classe: tintas, solventes, pilhas e lâmpadas fluorescentes.

**Resíduos Classe II – Não perigosos:** são divididos em duas outras classes:

**Resíduos Classe II A – Não inertes:** são aqueles resíduos que não são enquadrados nem como resíduos perigosos (Classe I) e nem como resíduos inertes (Classe II B), podendo

apresentar propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água”, como por exemplo, as matérias orgânicas.

**Resíduos Classe II B – Inertes:** são resíduos que se amostrados de forma representativa e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada (ABNT NBR 10007), à temperatura ambiente, não tenham nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se o aspecto cor, turbidez, dureza e sabor”. Esta classe inclui os resíduos que apresentam baixa capacidade de reação com quaisquer substâncias, como exemplo, os tijolos cerâmicos, provenientes da construção civil.

### **2.1.3 Amostragem de Resíduos Sólidos - NBR 10.007/2004**

A amostragem de resíduos sólidos é feita através da coleta de uma quantidade representativa de resíduo, permitindo sua classificação e a determinação dos possíveis métodos de tratamento. A NBR 10.007/2004 apresenta os principais critérios e definições quanto ao procedimento de amostragem.

Como descreve a NBR 10.007/2004, com o levantamento dos processos que deram origem ao resíduo, obtém-se informações quanto ao seu volume, temperatura, constituintes principais e estado físico. Dada a heterogeneidade dos materiais, que podem se encontrar sob diversas formas (lodos, sólidos, líquidos multifásicos etc.), o plano de amostragem deve ser estabelecido antes de se coletar qualquer amostra, estabelecendo o tipo de amostrador mais adequado, o número de amostras a serem coletadas, o método de preservação, o tempo de armazenagem e os equipamentos de proteção a serem utilizados durante a coleta (ABNT, 2004).

Os materiais utilizados na confecção do amostrador não podem apresentar reatividade com o material a ser coletado e, caso não seja descartável, deve permitir a descontaminação total do equipamento para posterior utilização. De acordo com a NBR 10.007/2004 são recomendados diferentes amostradores, adequados a cada tipo de resíduo. A norma também chama a atenção para as precauções de segurança, sobretudo em casos particulares, de materiais que apresentem corrosividade, toxicidade, inflamabilidade, radioatividade, patogenicidade ou outros riscos à segurança do técnico responsável como desmoronamentos, explosões, choques elétricos, entre outros. Em função do tipo de acondicionamento do resíduo, a NBR 10.007/2004 apresenta diferentes procedimentos de amostragem: 1) Amostragem em tambores e recipientes similares; 2) Amostragem em caminhão-tanque; 3)



Amostragem em recipiente contendo pó ou resíduos granulados; 4) Amostragem em lagoas de resíduos; 5) Amostragem em leitos de secagem, lagoas secas e solos contaminados; 6) Amostragem em montes ou pilhas de resíduos; 7) Amostragem em tanques ou contêineres de armazenagem; e 8) Amostragem de resíduos sólidos heterogêneos.

## 2.2 DESTINAÇÃO E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS

A heterogeneidade na composição dos resíduos sólidos dificulta a destinação adequada destes materiais, principalmente, devido à variação na fração orgânica, na porcentagem de umidade e na origem destes resíduos (SANTOS, 2011). A gestão de resíduos é um dos temas abordados na Agenda 2030, cujo prazo foi antecipado para 2020, no que diz respeito ao manejo de resíduos que podem representar impactos negativos para o meio ambiente e à saúde pública.

Com o objetivo de restaurar o valor das matérias primas contidas nos resíduos e restituí-las à cadeia produtiva, a PNRS orienta quanto aos procedimentos para a implantação da logística reversa no Brasil, por meio da responsabilidade compartilhada de produtores, consumidores, importadores, comerciantes e distribuidores. A logística reversa é um “instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, com destinação final ambientalmente adequada” (BRASIL, 2010).

Entre as possibilidades de destinação dos resíduos, existem os Pontos de Entrega Voluntária (PEV), onde consumidores podem devolver os materiais pós consumo, que após a separação, são retornados aos produtores ou às centrais de condicionamento, remanufatura, reprocessamento, reparo, reciclagem ou reuso (ALMEIDA; AMARAL, 2006). Neste caso, o produtor tem a responsabilidade de buscar maneiras de reaproveitar os resíduos ou de selecionar a destinação final ambientalmente correta.

De acordo com a Resolução Conama n° 275/2001, a coleta seletiva nos PEVs pode ocorrer por meio da instalação de caçambas e containers de cores determinadas para cada tipo de material. Assim, a contaminação do solo e da água pode ser relativamente reduzida em detrimento da coleta seletiva, permitindo também a utilização racional dos aterros e a diminuição do volume de rejeitos a ser eliminado (ALMEIDA; AMARAL, 2006).

Por mais que apresentem baixa periculosidade, os resíduos da construção civil e demolição (RCD), apresentaram um aumento muito grande no volume gerado e a disposição

muitas vezes é incorreta. Diante da relevância da gestão dos RCD para o saneamento urbano, as Áreas de Transbordo e Triagem (ATT) se apresentam como uma alternativa de destinação, e contribuem para a implementação de políticas públicas que visam a melhoria da qualidade de vida e do meio ambiente (FUKUROZAKI; SEO, 2004). De acordo com o decreto 42.217/2002, as ATTs podem ser caracterizadas como:

[...] os estabelecimentos privados destinados ao recebimento dos resíduos da construção civil e resíduos volumosos, gerados e coletados por agentes privados e que deverão ser usadas para a triagem dos resíduos recebidos, eventual transformação e posterior remoção para adequada disposição.

Segundo Fukurozaki e Seo (2004), os grandes volumes de RCD que chegam às ATTs ocorrem devido à facilitação do descarte dos resíduos gerados, proporcionada pela diminuição das distâncias percorridas no transporte e o custo da remoção. As autoras destacam que “a triagem dos materiais que são descartados com os RCD também possibilita novas formas de destinação para estes resíduos: reciclagem de embalagens, compostagem de resíduos orgânicos e podas vegetais, desmontagem e reaproveitamento de resíduos volumosos; interrompendo-se o contínuo aterramento de componentes plenamente reaproveitáveis e o inexorável esgotamento das áreas de sustentação ao desenvolvimento urbano.”

Outra alternativa de destinação dos resíduos são as usinas de reciclagem, onde os materiais inorgânicos são separados e moídos e os orgânicos são compostados, visando a produção de fertilizante ou condicionador de solo. Nardin, Prochnik e Carvalho (2002) relatam que o funcionamento das usinas de reciclagem ocorre nas etapas: deposição do resíduo, seguida da separação manual em esteiras de todos os elementos recicláveis inorgânicos, passagem por moinho de martelos (cominuição dos resíduos) e o empilhamento em leiras, para a fermentação aeróbica. Este tratamento de resíduos oferece como vantagem a não-proliferação de vetores de doença nas leiras, devido ao calor gerado em seu interior, pelo processo de fermentação aeróbica, que elimina as larvas depositadas e afugenta os roedores, além de evitar os odores da putrefação.

A lei 12.305/2010 da PNRS, define como disposição final, a distribuição ordenada de rejeitos em aterros, de maneira que sejam obedecidas normas operacionais específicas, com o objetivo de evitar riscos à saúde e à segurança pública, visando também, minimizar os impactos ambientais relacionados aos rejeitos.

De acordo com o último Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ABRELPE, 2019), atualmente a disposição final de resíduos em nosso país ocorre, principalmente, em aterros sanitários (59,5%); em aterros controlados (23%) e lixões a céu aberto (17,5%). Nos lixões, os rejeitos são dispostos diretamente no solo, de forma inadequada, tendo consequências negativas para o meio ambiente, devido aos riscos de contaminação do solo e dos recursos hídricos. Segundo Costa *et al.* (2017), a disposição incorreta de resíduos pode contribuir com a poluição do ar, por meio da geração de gases poluentes, e também com a degradação do solo, além de intensificação de enchentes, fatores que, reunidos, contribuem com a proliferação de doenças de veiculação hídrica e contaminação de águas superficiais e subterrâneas.

O aterro controlado também dispõe os resíduos diretamente no solo, se diferenciando dos lixões pelo recobrimento com solo, mas mantém os danos de contaminação e riscos à saúde e ao meio ambiente dos lixões, por não adotar sistemas de captação e tratamento do chorume e dos gases gerados. A normatização para esta alternativa de disposição de rejeitos foi cancelada em 2015, sem substituição, considerando que essa forma de disposição não é segura para o ambiente e para a saúde pública.

Neste aspecto, o aterro sanitário tem sido a alternativa mais incentivada, por ser considerada a mais apropriada para a disposição final de rejeitos. Neste processo os rejeitos são compactados em camadas entremeadas por camadas de solo e, antes de iniciar a operação do aterro, o solo é impermeabilizado para proteger da contaminação por chorume, que é coletado e tratado, o que também é realizado com os gases gerados da decomposição dos resíduos.

### 2.3 NORMAS PARA PROJETO, CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO DE ATERROS

Para a elaboração de projetos de aterro devem ser atendidas as normas preconizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que apresentam as diretrizes no âmbito técnico para a construção de aterros, referente à impermeabilização de base e superior; ao sistema de drenagem de lixiviados; ao monitoramento ambiental e geotécnico; ao acompanhamento do volume de gases produzidos; a exigência de células especiais no caso dos resíduos de serviços de saúde e também a definição do uso futuro da área do aterro, quando terminadas as atividades. De acordo com a norma NBR 8.419/96, o projeto de um aterro sanitário deve ser obrigatoriamente constituído de memorial descritivo, memorial técnico, apresentação da estimativa de custos e do cronograma, plantas e desenhos técnicos.

As normas da ABNT específicas para cada tipo de aterro são:

- NBR 10.157:1987 - Aterros de Resíduos Perigosos - Critérios para Projeto, Construção e Operação.

- NBR 8.419:1996 - Apresentação de projetos de Aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos - Procedimento.

- NBR 13.896:1997 - Aterros de Resíduos Não Perigosos e não inertes - Critérios para Projeto, Implantação e Operação.

- NBR 15.113:2004 - Aterro para resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Diretrizes para projeto, implantação e operação.

- NBR 15.849/2010 - Aterros sanitários de pequeno porte - Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento.

### **2.3.1 Aterro de Resíduos Perigosos**

De acordo com o Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos (IBAM, 2001), os resíduos industriais compõem grande parte dos resíduos perigosos – Classe I. No Brasil, o tratamento e destinação desses resíduos são de responsabilidade do próprio gerador, de maneira que o poder público exige que os mesmos apresentem sistemas de manuseio, estocagem, transporte e destinação final adequados. Monteiro (2006) destaca que na categoria de resíduos industriais podem ser incluídos os produtos químicos (cianureto, pesticidas, solventes), metais (mercúrio, cádmio, chumbo) e solventes químicos, que apresentam ameaças aos ciclos naturais onde são lançados. Neste aspecto, o aterro industrial se apresenta como uma alternativa de destinação destes resíduos, e pode ser projetado e classificado, conforme a periculosidade dos resíduos que serão nele dispostos. Em tais aterros, se faz necessária a utilização de técnicas rigorosas, que permitam a disposição controlada no solo, visando não causar riscos e danos à saúde pública, minimizando também os impactos ambientais (LOUREIRO, 2005; PINTO 2011).

Independentemente do tipo de aterro, existem pontos fundamentais na concepção dos projetos, que não podem ser ignorados, tais como os sistemas de drenagem pluvial, executados por meio de barreiras e valas de drenagem, para que as águas da chuva sejam desviadas do aterro, evitando o aumento de volume de líquido a ser tratado. Deve ser realizada também a impermeabilização do leito, por meio de camadas de materiais

impermeáveis, para evitar a contaminação do solo e do nível freático com águas de chuva que percolam pelos resíduos (LOUREIRO, 2005).

Em decorrência das necessidades apresentadas, nos casos de aterros para resíduos industriais Classe I, deve ser atendida a NBR 10.157/87, que contempla os critérios de projeto, construção e operação do aterro. Nesta norma são abordados os critérios de localização do aterro, de monitoramento e proteção de águas subterrâneas, orientação sobre impermeabilização, drenagem superficial e do lixiviado, além de tratamento do mesmo. Também são estabelecidas medidas de segurança, por meio da segregação dos resíduos e da elaboração de um plano de emergência. Esta norma contempla, ainda, os procedimentos de registro e operação, condições gerais de operação e plano de encerramento do aterro (ABNT, 1987).

#### *Plano de Emergência*

De acordo com a NBR 10.157/1987, o plano de emergência é definido como o conjunto de ações a serem tomadas em casos de ocorrências acidentais, como por exemplo, fogo, explosão, derramamento e liberação de gases tóxicos, além de apresentação de equipamentos de segurança a serem instalados, incluindo os nomes dos responsáveis pela coordenação das ações de emergência no local (ABNT, 1987).

De acordo com a NBR, o plano de fechamento se dá pela descrição dos procedimentos a serem realizados quando do encerramento das atividades do aterro, sendo os procedimentos compostos pelas medidas que promoverão a desativação, as operações de manutenção que ocorrerão pós fechamento, as estimativas da qualidade e quantidade de resíduos presentes no aterro até o momento e do uso do local após o término das operações. O plano de inspeção e manutenção preventiva é descrito pela NBR 10.157/1987, como o conjunto de atividades rotineiras necessárias para promover a manutenção adequada do aterro.

#### *Critérios para localização*

A escolha do local a ser utilizado para a construção e operação de aterro sanitário de resíduos perigosos deve levar em conta os seguintes fatores:

- a) o impacto ambiental a ser causado pela instalação do aterro seja minimizado;
- b) a aceitação da instalação pela população seja maximizada;
- c) esteja de acordo com o zoneamento da região;
- d) possa ser utilizado por um longo espaço de tempo, necessitando apenas de um mínimo de obras para início da operação.

Além disso, são avaliados aspectos técnicos, tais como topografia, geologia e tipo de solo existente, recursos hídricos, vegetação, acessos, tamanho disponível e vida útil, custos e distância mínima dos centros populacionais, conforme determina a NBR 10.157/1987.

#### *Análise de resíduos*

No caso de aterros de resíduos perigosos, há a necessidade de uma rotina de amostragem e análise de resíduos, a fim de monitorar os resíduos que chegam, de maneira que se estabelece os parâmetros a serem utilizados em cada resíduo, método de amostragem, de acordo com a NBR 10.007/2004, a frequência de análise, características de periculosidade e incompatibilidade com outros resíduos.

#### *Monitoramento de águas subterrâneas*

No âmbito de monitoramento, todas as instalações que participem do processo de tratamento, estocagem ou deposição de resíduos perigosos devem possuir sistema de monitoramento de águas subterrâneas. São estabelecidos então os locais dos poços de monitoramento, o período de monitoramento e o programa de monitoramento (ABNT, 1987).

#### *Inspeção e manutenção*

De acordo com a NBR 10.157/1987, o proprietário ou encarregado da operação deve inspecionar a instalação de modo a identificar e corrigir eventuais problemas, que possam provocar a ocorrência de acidentes prejudiciais ao meio ambiente ou à saúde humana. A instalação deve possuir um plano de inspeção para verificar a integridade de seus componentes tais como de monitoramento das águas superficiais e subterrâneas, de segurança e daqueles responsáveis pela operação e estrutura do aterro (drenos, diques, bernas e bombas).

#### *Condições gerais de operação*

Para a operação de aterros de resíduos perigosos deve-se atentar a alguns aspectos estabelecidos pela NBR 10.157/1987 como por exemplo a impossibilidade de recebimento de materiais reativos e inflamáveis que não tenham passado por tratamento prévio. Também existem regras para disposição de resíduos líquidos e de embalagens.

#### *Encerramento do aterro*

No plano de encerramento são reunidas as etapas a serem realizadas para o fechamento do aterro, com as medidas a serem tomadas e as atividades a serem desenvolvidas após o

encerramento do aterro. Entre as atividades após o encerramento do aterro, destaca-se o monitoramento das águas subterrâneas por um período de 20 anos, bem como, a manutenção do sistema de drenagem e de tratamento de líquido percolado até o término de sua geração, para evitar a contaminação ambiental e os riscos à saúde pública.

### **2.3.2 Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos**

As normas que tratam de forma abrangente sobre os aterros sanitários são a NBR 8.419:1996 e a NBR 13.896:1997 (resíduos não perigosos e não inertes). Estas normas enfatizam as prescrições normativas para instalação de aterros sanitários convencionais, sendo constituídos por obras e instalações complexas e onerosas que, em alguns casos, não são necessárias a um aterro de pequeno porte.

Neste aspecto e, considerando o resultado do Censo de 2010, que revelou que grande parte dos municípios brasileiros apresentava uma população inferior a 10.000 habitantes e condições ambientais diversificadas, foram identificadas necessidades de ajustes para que estes municípios pudessem atender a Política Nacional de Resíduos Sólidos em sua meta de extinção dos lixões e disposição de resíduos em aterros. Assim, inicialmente foi estabelecida a possibilidade de consórcios públicos constituídos por estes municípios, sempre que as condições físicas permitirem, para viabilizar a implantação de aterros sanitários de pequeno porte.

Desta forma, em 2010, ao mesmo tempo em que foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos, pela Lei Federal 12.305/2010, também foi elaborada a NBR 15.849/2010, que estabelece diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento de aterros sanitários de pequeno porte. Trata-se de uma alternativa para municípios menores, que podem aproveitar a simplificação da norma para elaborar o projeto e construir o aterro, que pode suportar até 20 toneladas de resíduos por dia, o equivalente à produção de cidades com até 30 mil habitantes. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019), o Brasil possui 5.570 municípios e, destes, 73% apresentam entre 10 e 20 mil habitantes, o que justifica a implementação de aterros de pequeno porte em todo o território brasileiro.

Assim, a norma NBR 15849/2010 da ABNT, simplificou as condicionantes da NBR 8419/1996, devido à redução dos elementos de proteção ambiental, o que implicou em redução de custos de implantação e viabilizou a adoção de aterros sanitários, sem prejuízo da

minimização dos impactos ao meio ambiente e à saúde pública. Essa norma foi criada com a perspectiva de acabar com os lixões espalhados pelo território brasileiro, principalmente em municípios de pequeno porte, onde a construção de um aterro de grande porte implicaria em investimentos elevados, inviabilizando essa disposição, e tornando imperativa a necessidade da constituição de consórcios municipais para a disposição dos resíduos sólidos urbanos em aterros de grande porte.

Neste sentido, uma das inovações propostas pela NBR 15849/2010 foi a possibilidade de dispensa da impermeabilização complementar, considerando-se como critérios o excedente hídrico, o coeficiente de permeabilidade, a profundidade do lençol freático e a fração orgânica dos resíduos. De maneira geral, a simplificação das condicionantes tornou viável aos municípios de pequeno porte cumprir a determinação da Lei 12.305/2010, que além de acabar com os lixões, estabeleceu a gestão compartilhada de resíduos, a ampliação e a melhoria da produtividade da coleta seletiva. Neste aspecto, para a elaboração de projetos e construção de aterros é preciso considerar que cada município é um caso específico e requer atenção às peculiaridades relacionadas ao tipo de solo, tipo de aquífero e nível freático, topografia regional, regime hídrico, pluviosidade, entre outros aspectos, que são fundamentais para a implantação de um aterro e que variam, de acordo com a região. As equipes técnicas também são fundamentais para o sucesso nas etapas de projeto, implantação, operação, monitoramento e encerramento/desativação de um aterro, visando a manutenção para que, com o passar do tempo, os aterros sanitários não se transformem em lixões.

De acordo com Bellezoni *et al.* (2011), embora a NBR 15849/2010 objetive a simplificação da tecnologia de disposição final de resíduos sólidos, esta apresentou alguns pontos questionados no meio científico, quanto à determinação das medidas a serem tomadas em algumas situações, como por exemplo, quanto aos padrões de proteção de águas subterrâneas; à necessidade ou não de impermeabilização; à dispensa do monitoramento de águas subterrâneas, mesmo quando a impermeabilização não for julgada necessária e por não prever o uso futuro da área do aterro como integrante da paisagem urbana. Estes autores verificaram que em aterro sanitário de pequeno porte, no estado de São Paulo, as tecnologias simplificadas constituíram alternativas viáveis para a disposição final dos resíduos sólidos urbanos em pequenos municípios, e consideraram louvável a iniciativa da ABNT em criar uma NBR com critérios para estes empreendimentos. Ainda assim, ressaltaram a necessidade da análise rigorosa do local selecionado, verificando-se a topografia local e seus constituintes litológicos e hidrológicos, objetivando a compatibilidade das características da tecnologia escolhida com as necessidades e condições apropriadas para cada região.



### *Caracterização dos resíduos e equipamentos de transporte*

De acordo com a NBR 8419/1996, no memorial descritivo do projeto para aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, um dos tópicos a ser desenvolvido é a caracterização dos resíduos que serão dispostos no aterro sanitário e dos equipamentos de transporte. Desta forma, deve ser realizada uma análise qualitativa, contendo informações quanto a origem e a qualidade do material a ser acomodado, e uma análise quantitativa, contendo o volume diário e mensal, bem como, a frequência e horário de recebimento. Tais medidas visam assegurar a melhor logística para o funcionamento do aterro, visto que impacta diretamente o âmbito socioambiental e urbanístico do município.

### *Monitoramento*

Visando o controle técnico dado o projeto de construção do aterro, deve-se apresentar um levantamento de sua área de influência, através de um plano de monitoramento a ser executado durante e após o término das atividades. Como estabelece a NBR 8.419/1996, o monitoramento é imprescindível para assegurar a salubridade da comunidade do entorno e a integridade da obra, bem como, a preservação do meio ambiente, sendo necessários os monitoramentos ambiental e geotécnico.

O monitoramento ambiental é realizado para que haja conformidade com as obrigações impostas pelos órgãos ambientais. Assim, o projeto deve ser sujeito à análise do Órgão Seccional Estadual de Controle da Poluição e Proteção Ambiental (OECPPA). Ainda visando atender à legislação vigente, deve ser realizado o controle das águas superficiais, por meio de análises físico-químicas e bacteriológicas, com amostragens à montante e à jusante do aterro e das águas subterrâneas, por meio da instalação de poços de monitoramento à montante e à jusante no sentido do fluxo do escoamento preferencial do lençol freático.

Como estabelece a NBR 8419/1996, o projeto do aterro deve prever também a drenagem de biogás e a instalação de elementos para captação, armazenamento e tratamento dos lixiviados, indicando-se todos os detalhes técnicos envolvidos, bem como, uma estimativa da descarga de líquidos lixiviados a drenar. Para tanto, são feitas análises físico-químicas que auxiliam na caracterização do chorume.

Para o monitoramento geotécnico, deve ser realizada a inspeção visual do maciço, que indica a existência de eventuais processos erosivos, como fissuras e trincas na camada de cobertura, ou de movimento de massa dos resíduos. Para garantir a integridade dos sistemas de drenagem e de impermeabilização, deve-se medir tanto os deslocamentos verticais

(recalques) e horizontais, por meio de marcos superficiais e inclinômetros, quanto as pressões de gases e líquidos no interior do maciço, utilizando piezômetros.

#### *Plano de encerramento do aterro*

O plano de encerramento do aterro indica a previsão de quando as atividades serão concluídas e os cuidados posteriores, como por exemplo, o controle de vetores. Também deve apresentar o uso futuro da área, visando a geração de empregos e de renda ou o lazer da comunidade, sendo comum a construção de centros de treinamento e capacitação de trabalhadores, bem como, parques de lazer e até mesmo edificações de pequeno porte.

### **2.3.3 Aterros de Inertes e Resíduos de Construção Civil**

As condições exigíveis para o projeto, implantação e operação de aterros de resíduos inertes e de construção civil de classe A são estabelecidas pela norma NBR 15.113/2004 da ABNT.

A construção civil é um importante segmento da indústria brasileira, indicando tanto crescimento econômico, quanto social. Entretanto, promove intenso consumo de recursos naturais, alterando as paisagens e destacando-se pela grande produção de resíduos (PINTO, 2005). De maneira geral, os resíduos de construção civil e demolição (RCD) são classificados como resíduos de baixa periculosidade, cujo impacto associado é sobretudo devido ao grande volume gerado. Em contrapartida, certos materiais e embalagens podem ser perigosos, bem como, favorecer a proliferação de vetores de doenças, tornando-se necessária a aplicação de normas específicas (KARPINSK *et al.*, 2009).

De acordo com Pinto e Gonzáles (2005), a geração dos resíduos da construção civil está associada sobretudo ao elevado desperdício de materiais durante o processo de execução da obra, além de danos no recebimento, transporte e armazenamento. Brasil (2010) ressalta que somado às construções, as reformas, ampliações e demolições são outras atividades altamente geradoras de resíduos. Neste contexto, vale destacar a necessidade da boa execução do projeto, com detalhamentos e precisão nos memoriais descritivos, emprego de mão-de-obra qualificada, atenção ao transporte e armazenagem e controle durante a execução, para reduzir o volume gerado e a utilização dos recursos naturais. Os RCD representam, portanto, um grave problema em diversos municípios brasileiros, causando uma sobrecarga nos sistemas de limpeza pública das cidades, visto que, correspondem a aproximadamente, 50%

a 70% da massa dos resíduos sólidos urbanos – RSU no Brasil (BRASIL, 2005). Além do grande volume de resíduos gerados, a disposição irregular ainda é uma constante em grande parte do território nacional, causando problemas de ordem ambiental e de saúde pública.

Moraes (2006) destaca que o maior problema de destinação final irregular dos RCD ocorre sobretudo das obras e reformas de pequeno porte, realizadas pela população de menor renda. Isto porque, na maioria dos casos, trata-se de construções informais, que apesar de representar pouco volume isoladamente, por serem frequentes, contribuem em uma parcela significativa dos RCD gerados. Pinto (1999) destaca ainda que essas áreas de disposição irregular acabam atraindo todo e qualquer tipo de resíduo, comprometendo a paisagem urbana e acarretando em severos custos sociais e ambientais.

Neste contexto, a Resolução nº 307/2002 do Conselho Nacional do meio Ambiente (CONAMA, 2002), representa um avanço no âmbito legal e técnico ao responsabilizar os geradores pela segregação, armazenamento e encaminhamento para reciclagem (se possível) e disposição final adequada, conforme a classe do material gerado. Desta forma, parte dos resíduos pode ser inserida novamente na cadeia produtiva, reduzindo a degradação ambiental e também o consumo dos recursos naturais, além de aumentar a vida útil dos aterros (VALOTTO, 2007).

#### *Classificação dos resíduos da construção civil*

A Resolução Conama no 307/2002 e demais resoluções complementares do Conama classificam os resíduos da construção civil em:

**Classe A** - resíduos com potencial de reutilização ou reciclagem como agregados, tais como:

- i) De construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- ii) De construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
- iii) De processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras.

**Classe B** - resíduos recicláveis para outros fins, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, gesso, isopor, latas de tintas imobiliárias (logística reversa) e outros.

**Classe C** - resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem e recuperação, tais como o isopor.

**Classe D** - resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos, que contenham amianto, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

#### *Triagem dos RCD*

Como estabelece a NBR 15113/2004, os resíduos recebidos devem ser previamente triados, de modo a assegurar que apenas os RCD pertencentes à classe A e, ou resíduos inertes sejam dispostos no aterro. Os RCD de classes B, C ou D devem ser destinados respeitando as determinações previstas em norma (PEVs, ATTs, usinas de reciclagem e aterros). Quanto aos resíduos classificados como perigosos (classe D) ressalta-se a necessidade de previsão de área específica e protegida de intempéries para armazenamento temporário e posterior disposição em aterros de resíduos perigosos.

#### *Localização do aterro de inertes*

Como estabelece a NBR 15113/2004, para a implantação de aterros de resíduos de Classe A e inertes, a escolha do local deve objetivar a minimização do impacto ambiental e a aceitação da instalação pela população do entorno. Também são exigidas investigações geológicas e geotécnicas da região, para avaliar os riscos de contaminação das águas quanto às condições de estabilidade dos maciços. Na investigação deve ser realizado o mapeamento de superfície e a sondagem de reconhecimento, por meio de ensaios estabelecidos pela norma NBR 6484/2020 da ABNT, em conjunto com o ensaio de permeabilidade dos solos, podendo ser realizadas análises complementares. (VALOTTO, 2007).

## 2.4 APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS EM ATERROS

Como estabelece a NBR 15113/2004, para a implantação de aterros de resíduos de Classe A e inertes, a escolha do local deve objetivar a minimização do impacto ambiental e a aceitação da instalação pela população do entorno. Também são exigidas investigações geológicas e geotécnicas da região, para avaliar os riscos de contaminação das águas quanto às condições de estabilidade dos maciços. Na investigação deve ser realizado o mapeamento de superfície e a sondagem de reconhecimento, por meio de ensaios estabelecidos pela norma NBR 6484/2020 da ABNT, em conjunto com o ensaio de permeabilidade dos solos, podendo ser realizadas análises complementares. (VALOTTO, 2007).

Os geossintéticos vêm sendo cada vez mais empregados em aterros para desempenhar diferentes funções. Conforme a NBR ISO 10318/2018 (ABNT, 2018), entre as várias funções

dos geossintéticos em aterros destacam-se a drenagem de líquidos e gases, filtração, impermeabilização, controle de erosões, reforço de estruturas geotécnicas e barreiras de separação. Existem também as chamadas propriedades intrínsecas, que trazem vantagens no uso de geossintéticos quando comparados ao concreto e outros materiais. Maia (2016) esclarece que tais propriedades estão relacionadas ao fato dos geossintéticos ocuparem menor volume, apresentarem homogeneidade e uniformidade, dispor de relativa compressibilidade, podendo ser facilmente transportados e instalados. Medeiros (2019) ressalta que os geossintéticos desempenham importante função em obras de engenharia, pelo fato de agregar rapidez, desempenho, tecnologia industrial e segurança às obras, além de apresentarem um fator muito positivo na engenharia moderna que consiste na possibilidade de reduzir a utilização de recursos naturais.

Segundo Rocha (2013), gerente de resíduos sólidos do Departamento de Ambiente Urbano do Ministério do Meio Ambiente, mesmo que seja comprovada a eficiência dos aterros sanitários, existem ainda desafios em relação à disseminação de sua implantação e operação, como por exemplo, o alto custo do processo e dificuldade de manutenção e operação. Estas limitações impedem o funcionamento e o monitoramento correto dos aterros. Conforme destacou Medeiros (2019), a problemática apresentada faz com que o uso e a aplicação de geossintéticos seja considerada uma excelente solução para o problema, uma vez que permite diminuir os custos de instalação, além de tornar mais fácil a manutenção e operação dos aterros sanitários, proporcionando a implementação de melhores sistemas de impermeabilização, drenagem de gases e líquidos e, conseqüentemente, melhor tratamento e aproveitamento dos resíduos.

No ano de 1990, foi criado o Comitê Brasileiro de Geossintéticos da ABNT, com o intuito de normatizar os processos e características relacionados aos geossintéticos. A seguir são apresentadas as normas brasileiras vigentes, disponíveis para aquisição na ABNT:

ABNT NBR ISO 10318-1:2018 - Geossintéticos Parte 1: Termos e definições.

ABNT NBR ISO 10318-2:2018 - Geossintéticos Parte 2: Símbolos e pictogramas.

ABNT NBR ISO 10321:2013 – Geossintéticos: Ensaio de tração de emendas pelo método da faixa larga.

ABNT NBR ISO 25619-1:2013 – Geossintéticos: Determinação do comportamento em compressão Parte 1: Propriedades na fluência à compressão.

ABNT NBR ISO 12957-2:2013 – Geossintéticos: Determinação das características de atrito Parte 2: Ensaio de plano inclinado.

ABNT NBR ISO 12957-1:2013 – Geossintéticos: Determinação das características de atrito Parte 1: Ensaio de cisalhamento direto.

ABNT NBR ISO 10319:2013 – Geossintéticos: Ensaio de tração faixa larga.

ABNT NBR ISO 12236:2013 – Geossintéticos: Ensaio de puncionamento estático (punção CBR).

ABNT NBR ISO 13433:2013 – Geossintéticos: Ensaio de perfuração dinâmica (ensaio de queda de cone).

ABNT NBR ISO 9862:2013 – Geossintéticos: Amostragem e preparação de corpos de prova para ensaios.

ABNT NBR ISO 9863-1:2013 – Geossintéticos: Determinação da espessura a pressões especificadas Parte 1: Camada única.

ABNT NBR ISO 9864:2013 – Geossintéticos: Método de ensaio para determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos correlatos.

ABNT NBR 15226:2005 – Geossintéticos: Determinação do comportamento em deformação e na ruptura, por fluência sob tração não confinada.

ABNT NBR 15856:2010 – Geomembranas e produtos correlatos: Determinação das propriedades de tração.

ABNT NBR ISO 11058:2013 – Geotêxteis e produtos correlatos: Determinação das características de permeabilidade hidráulica normal ao plano e sem confinamento.

ABNT NBR ISO 12958:2013 – Geotêxteis e produtos correlatos: Determinação da capacidade de fluxo no plano.

ABNT NBR ISO 12956:2013 – Geotêxteis e produtos correlatos: Determinação da abertura de filtração característica.

ABNT NBR ISO 10320:2013 – Geotêxteis e produtos correlatos: Identificação na obra.

A Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS), define os geossintéticos como um material plano, fabricado a partir de polímeros, sejam estes naturais ou sintéticos, cujo uso se dá em contato com o solo em obras de engenharia (IGS, 1996). Esta instituição destaca entre as vantagens da utilização de geossintéticos, a sustentabilidade ambiental, a facilidade de instalação e execução da obra, a não exigência de mão de obra especializada e por dispensar o uso de equipamentos de grande porte, além de apresentar boa capacidade de suporte e versatilidade de aplicações. Estes aspectos tornam a utilização dos geossintéticos em aterros um atrativo técnico e financeiro.

De acordo com Vidal (1992), a presença de um geossintético tem basicamente função associada à proteção, separação, filtragem, drenagem ou reforço do solo. Segundo Duarte

(2009), para que os aterros não se transformem em fontes de contaminação para o ambiente em que está inserido e, considerando que cada aterro é instalado em um ambiente com características nem sempre ideais, do ponto de vista geológico e geotécnico, atualmente são projetados sistemas de confinamento. Portanto, é preciso considerar que o dimensionamento e o uso incorreto de materiais podem comprometer a durabilidade e a qualidade do aterro, podendo resultar em contaminação do solo e de aquíferos da região.

Geralmente os aterros são construídos com diferentes materiais, porém com a crescente normatização e pressão de legislações, nos últimos dez anos houve maior exigência para a otimização de técnicas de projeto e de construção. Este cenário é oportuno para o mercado de geossintéticos, uma vez que sua aplicação em obras de infraestruturas e saneamento tem sido cada vez mais difundida (MEDEIROS, 2019). Maia (2019) ressaltou que a versatilidade dos geossintéticos, tanto em suas funções, quanto na facilidade de instalação, auxiliaram no desenvolvimento de novas metodologias, visto que atendem às atuais exigências legais.

Atualmente, existem no mercado diversos tipos de geossintéticos, mas vale ressaltar que, para serem aplicados em projetos de aterros, devem atender aos critérios de drenagem de chorume e gases, impermeabilização e/ou camadas de separação, dependendo do tipo de resíduo disposto. A seguir serão apresentados os diversos geossintéticos utilizados em diferentes tipos de aterros.

*Geotêxteis* – Os geotêxteis são caracterizados como materiais têxteis e permeáveis com capacidade de filtração, apresentam qualidades hidromecânicas que permitem sua aplicação em variadas obras geotécnicas. Gomes (2001) apresenta dois tipos: tecidos e não tecidos (Figuras 1 e 2). Os geotêxteis geralmente apresentam cinco funções: proteção, separação, filtragem, drenagem, reforço, sendo amplamente utilizados em diferentes tipos de aterros (DUARTE, 2009).

Figura 1- Geotêxtil não tecido



Fonte: Inovageo (2019).

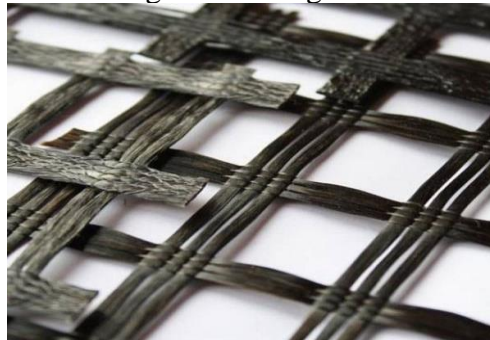
Figura 2 - Geotêxtil tecido



Fonte: Inovageo (2019).

*Geogrelhas* - As geogrelhas têm como característica principal a abertura de sua malha, que em comparação aos demais é maior, o que permite sua interação com o material granular, trazendo ao conjunto bom entrosamento (Figura 3). Segundo Suzuki (2012), o uso das geogrelhas em aterros se dá principalmente em contexto de necessidade de reforço de talude abaixo dos resíduos ou em caso de reforço dos solos de cobertura sobre geomembranas. A função de reforço faz com que o fator de segurança aumente significativamente, independente da altura do aterro. Duarte (2009) destaque que geogrelhas podem ser utilizadas como geossintético auxiliar com a função de estabilizar muros e taludes em aterros, o que trouxe a redução do impacto ambiental, por conta da diminuição de emissões de gases e de partículas sólidas para a atmosfera.

Figura 3 - Geogrelha



Fonte: Inovageo (2019).

*Georredes* - Conforme consta no IGS Brasil, as georredes são formadas por conjuntos de barras paralelas sobrepostas e ligadas a conjuntos de mesmo padrão, variando-se o ângulo de colocação, gerando uma malha densa e regular (Figura 4). O uso de georredes em aterros sanitários tem como função principal atuar nos sistemas de drenagem. Georredes e geocompostos drenantes em aterros são utilizados para propiciar uma melhor condução das águas pluviais e dos efluentes gerados, como por exemplo, lixiviados e gases (principalmente



o metano produzido na degradação dos resíduos), permitindo sua captação e posterior tratamento, sendo importante para garantir estabilidade e segurança (DUARTE, 2009).

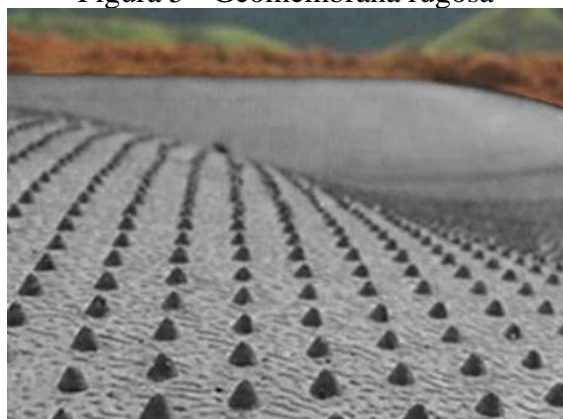
Figura 4 - Georrede



Fonte: Inovageo (2019).

*Geomembranas* - As geomembranas (Figuras 5 e 6) são compostas por telas contínuas e flexíveis, fabricadas a partir de um ou mais materiais sintéticos e também podem ser denominadas como barreiras geossintéticas, pois sua principal característica é a baixa permeabilidade (YIN; SHUKLA, 2006). As Geomembranas de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) impedem que o chorume entre em contato com o subleito, o que poderia causar contaminação do lençol freático. Koerner (2005) divide as geomembranas de acordo com sua superfície em dois grupos: lisas e rugosas. De maneira geral, o uso de geomembranas impermeáveis e sem componentes tóxicos em aterros tem como objetivo a impermeabilização e selagem, conferindo segurança ambiental aos aterros (DUARTE, 2009).

Figura 5 - Geomembrana rugosa



Fonte: Inovageo (2019).

Figura 6 - Geomembrana lisa



Fonte: Inovageo (2019).

*Geomantas* - De estrutura tridimensional permeável, quando é produzida com materiais biodegradáveis é denominada de biomanta (Figura 7). Sua função consiste em impedir o carreamento de partículas sólidas em períodos de chuva, sendo uma solução ecologicamente sustentável, pois auxilia no desenvolvimento e manutenção de cobertura vegetal (MEDEIROS, 2019).

Figura 7 - Biomanta



Fonte: Geofoco (2014).

*Geocompostos* – Quando se tem o intuito de combinar as melhores características de diferentes materiais, faz-se uma associação dos mesmos, ao que se dá o nome de geocompostos (Figura 8) (KOERNER, 2005). Segundo Lopes (2010), é comum encontrar geocompostos bentoníticos ou argilosos, geocompostos de drenagem e de reforço. A respeito dos geocompostos bentoníticos, que são utilizados em aterros, estes podem ser definidos como uma barreira hidráulica geossintética, formada por argila bentonítica sódica envolvida

por geotêxteis unidos somente nas bordas ou ao longo de toda a superfície, podendo, inclusive, ser aderida a geomembranas por adesivos químicos (DUARTE, 2009). Duarte (2009) ainda destaca que por mais que geocompostos bentoníticos possam ser utilizados como revestimento único, há uma utilização mais frequente em sistemas compostos de revestimentos geossintéticos com geomembranas e geocompostos drenantes, tanto na base como na cobertura de aterros de resíduos.

Figura 8 - Geocomposto Bentonítico – GLC



Fonte: Inovageo (2019).

*Geocélulas* - Formadas por estruturas tridimensionais compostas por tiras de poliéster ou polietileno de alta densidade, as geocélulas são estruturadas em um formato semelhante ao de um favo (YIN; SHUKLA, 2006), como pode ser observado na Figura 9. Tais células podem ser preenchidas por solo, areia ou brita, variando de acordo com a função requisitada e a disponibilidade.

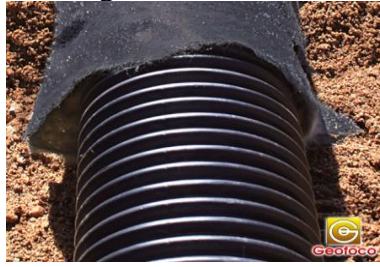
Figura 9 - Geocélulas



Fonte: Inovageo (2019).

*Geotubos* – Yin e Shukla (2006) apresentam os geotubos como tubos poliméricos, que desempenham a função de drenagem de fluidos ou gases, podendo ou não ser lisos ou prorrogados ou perfurados, sendo geralmente envoltos em geotêxtil (Figura 10).

Figura 10 - Geotubo



Fonte: Geofoco (2014).

O Quadro 1 apresenta as funções que um geossintético pode desempenhar e sua aplicação em aterros.

Quadro 1 – Funções de geossintéticos em aterros

<i>Função</i>	<i>Definição</i>	<i>Aplicação em aterros</i>
<i>Proteção</i>	<i>Usado para evitar ou limitar danos de elementos sujeitos ao efeito de ações localizadas sobre suas superfícies (YIN; SHUKLA, 2006).</i>	<i>Pode-se obter proteção ao colocar os geossintéticos entre dois materiais permitindo a proteção das cargas e deformações induzidas por um ao outro (YIN; SHUKLA, 2006).</i>
<i>Separação</i>	<i>O geossintético tem a função de separar trechos ou faixas de solo (MEDEIROS, 2019).</i>	<i>Em uma situação em que haja a combinação de camadas de diferentes tipos de solo, pode ser que a interface entre os mesmos comprometa a qualidade do projeto no caso de ocorrer algum tipo de alteração nas propriedades oriunda do contato (LOPES, 2010).</i>
<i>Filtração</i>	<i>O geossintético permite o fluxo de fluidos no seu interior ou através dele e, ao mesmo tempo, retém partículas de solo sujeitas às forças hidrodinâmicas (ISO 10318, 2016).</i>	<i>O dimensionamento dos geossintéticos em casos de filtração depende do fluxo do fluido, de maneira que possa apresentar flexibilidade e abertura da malha apropriadas para o destino (LOPES, 2010).</i>
<i>Drenagem</i>	<i>O geossintético atua no recolhimento e transporte de fluidos, como águas pluviais e águas freáticas, de maneira que se estabeleça um fluxo adequado (ISO 10318, 2016).</i>	<i>Os geossintéticos utilizados devem apresentar baixa permeabilidade (LOPES, 2010).</i>
<i>Reforço</i>	<i>Quando o geossintético é utilizado com o intuito melhorar as propriedades mecânicas de uma estrutura geotécnica, sua função é definida como de reforço (ISO 10318, 2016).</i>	<i>Os geossintéticos são aplicados em aterros na execução das fundações/base, sobre solos moles, ou em contenção de taludes, podendo ser associado também à obras de pavimentação (VERTEMATTI, 2004).</i>
<i>Controle de Erosão Superficial</i>	<i>Evitar os efeitos da movimentação de solo em superfícies de taludes e margens de rios. (MEDEIROS, 2019).</i>	<i>Os geossintéticos protegem a camada de solo que coberta contra os efeitos da erosão, por agentes atmosféricos ou tráfego de veículos (ISO 10318, 2016).</i>

Fonte: Compilado da literatura.

De acordo com Boscov (2008), os sistemas de impermeabilização compostos (solo argiloso compactado + geomembrana) são considerados como melhor solução para proteção do subsolo e das águas subterrâneas, visto que culminam na redução da condutividade hidráulica, além de facilitar o fluxo dos líquidos produzidos em direção ao sistema de coleta de percolado. O autor destaca que o procedimento de execução do revestimento de fundo deve ser executado de maneira rigorosa para garantir a sua qualidade e durabilidade. A Figura 11, apresenta a configuração de uma camada de proteção de fundo com aplicação da

geomembrana, cujo modelo será levado em conta no dimensionamento do aterro sanitário de pequeno porte em estudo.

Figura 11 - Configuração de uma camada de proteção de fundo de aterro sanitário



Fonte: Boscov (2008).

Vale destacar que existem condições que possibilitam dispensar o sistema de proteção de fundo, segundo os critérios estabelecidos pela norma NBR 15849 (ABNT, 2010), para certos aterros de pequeno porte. Tais critérios são apresentados na Tabela 1 e incluem o percentual de fração orgânica nos resíduos, o nível freático, a permeabilidade natural do solo e o valor de excedente hídrico anual.

Tabela 1 – Critérios para dispensar a impermeabilização de fundo de aterro sanitário

Limites máximos do excedente hídrico (mm/ano) <sup>a</sup>	Fração orgânica ≤ 30%				Fração Orgânica > 30%			
	Profundidade do freático (m)				Profundidade do freático (m)			
	1,50 < n ≤ 3	3 < n < 6	6 ≤ n < 9	n ≥ 9	1,50 < n ≤ 3	3 < n < 6	6 ≤ n < 9	n ≥ 9
$K^b \leq 10^{-6}$	250	500	1000	1500	188	375	750	1125
$10^{-6} \leq K^b \leq 10^{-5}$	200	400	800	1200	150	300	600	900
$10^{-5} \leq K^b \leq 10^{-4}$	150	300	600	900	113	225	450	675

<sup>a</sup> O excedente hídrico é a quantidade de água (em mm/ano) que percola através da camada de cobertura do aterro sanitário, atingindo a massa de resíduos e posteriormente chegando até a base do aterro. Para seu cálculo, devem ser utilizadas séries anuais de precipitações médias, de temperaturas (para estimativa da evapotranspiração) e o coeficiente de escoamento superficial, o qual deve ser adotado em função das características de permeabilidade do solo da camada de cobertura

<sup>b</sup> k = coeficiente de permeabilidade do solo local (k), em cm/s.

Fonte: Adaptação da NBR 15849 (2010).

## 2.5 MONITORAMENTO E TRATAMENTO DE EFLUENTES EM ATERROS

O que se percebe como um dos principais problemas de um aterro é o risco existente de poluição das águas superficiais e subterrâneas, que pode ocorrer em função dos processos de decomposição, aos quais os resíduos são submetidos (TORRES *et al.*, 1997). Sendo assim, faz-se necessária a coleta e o encaminhamento do chorume para que o mesmo seja tratado antes de retornar ao meio ambiente, por meio da drenagem, coleta e tratamento.

De acordo com a NBR 8419/1996, o deslocamento ou arraste de resíduo líquido, oriundo da decomposição do material putrescível presente nos depósitos é denominado como lixiviação. A composição deste líquido corresponde ao chorume e a água da chuva. Sua origem pode ser superficial ou subterrânea, sendo a primeira em decorrência de precipitação ou escoamento e a segunda por infiltração (ABNT, 1996).

Percolado é definido como o líquido que se movimenta através de um meio poroso. Em aterros o lixiviado (ou percolado) pode ter quatro diferentes fontes: 1) umidade natural do solo, que pode ser intensificada em períodos chuvosos; 2) formação de líquido por meio da ação das bactérias presentes nos resíduos, cujas enzimas dissolvem a matéria orgânica; 3) características do entorno do local de disposição dos resíduos, onde fontes de águas naturais podem auxiliar no processo (ROCHA, 2005).

O chorume é o líquido oriundo da decomposição das substâncias existentes nos resíduos. Caracteriza-se pela cor escura, mau odor e elevada demanda bioquímica de oxigênio (DBO). Vale ressaltar que a norma NBR 8419/1996 estabelece que todo projeto de aterro deve apresentar um sistema de captação, drenagem e disposição de líquidos percolados (chorume). O chorume tem composição variável, devido ao esgotamento progressivo da matéria orgânica biodegradável. Sendo assim, com o tempo, o potencial poluidor reduz paulatinamente, atingindo níveis que já não requerem tratamento (ALVES e TEIXEIRA, 2004).

Na Tabela 2, são apresentadas as faixas de variação de alguns parâmetros para chorumes determinadas em aterros sanitários brasileiros. O volume de chorume produzido em um aterro sanitário é diretamente influenciado pelas condições climáticas da região e do sistema de drenagem do local, podendo variar sazonalmente. A temperatura, os índices de precipitação e evapotranspiração, o tipo de material de cobertura das células e sua permeabilidade são outros fatores que atuam nas possíveis variações (IBAM, 2001).

Tabela 2 – Faixa de variação da composição de chorumes em aterros sanitários

Parâmetros	Máximo	Mínimo
	mg L <sup>-1</sup>	
Alcalinidade (CaCO <sub>3</sub> )	850	17.500
DBO <sub>5</sub>	15.000	50.000
DQO	21.000	78.000
Sólidos Suspensos	660	5.000
Nitrogênio amoniacal	50	5.000
Nitrato	0,1	250
Nitrito	0,1	40
Arsênio	0	200
Cádmio	0	2
Cianetos	0	10
Zinco	0	25
Cloretos	100	12.400
Cobre	0	8
Cromo total	0	300
Ferro	2	2.100
Manganês	0	35
Mercurio	0	0,05
Níquel	0	5
Chumbo	0	2
Sulfato	18	2.000
Fósforo total	0,1	31
pH (unidade)	3,5	9

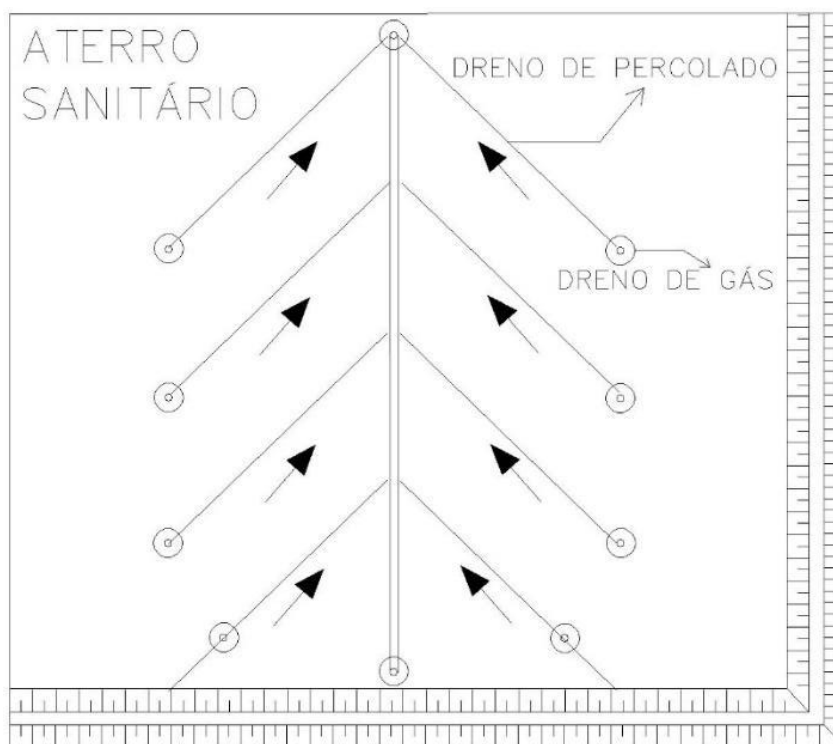
Fonte: Claretto e Held (2000) *apud* Segato (2000).

O sistema de drenagem do chorume é constituído de um sistema de drenos implantados sobre a camada de impermeabilização inferior. Fieira (2014) destaca que o sistema mais utilizado é denominado de espinha de peixe, ilustrado na Figura 12, onde os drenos



secundários direcionam o chorume coletado até o dreno principal, que por sua vez, encaminha o material até a estação de tratamento. O leito de tais drenos é constituído de brita ou rachão, seguido de areia grossa e de areia média, de forma a evitar que haja colmatção dos drenos pelos sólidos em suspensão (FIEIRA, 2014). Outros materiais que podem ser utilizados no sistema de drenagem são o bidim ou geotêxtil (IBAM, 2001).

Figura 12 - Representação esquemática sistema de drenagem modelo espinha de peixe

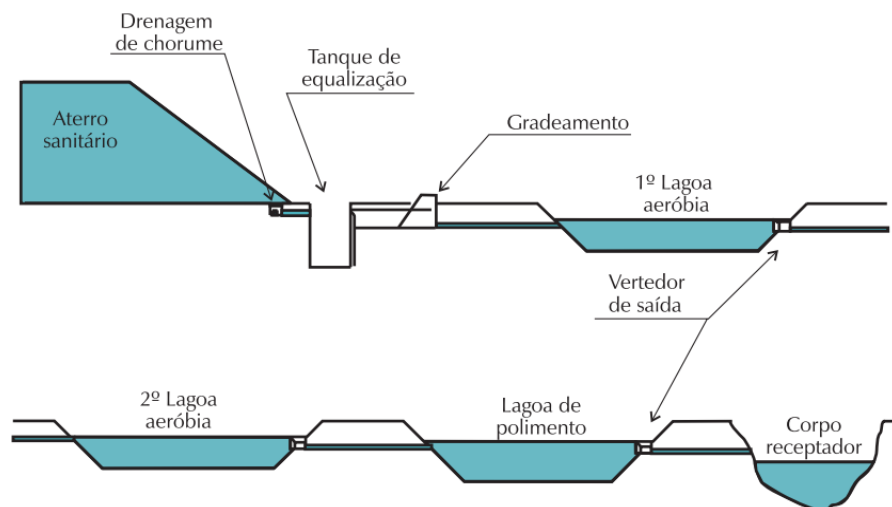


Fonte: Autoras (2020).

De acordo com o Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos (IBAM, 2001), para controle, monitoramento e tratamento do chorume é necessário que seja determinada a vazão gerada no aterro por meio de medição direta. Uma alternativa é o método expedito, onde a vazão de chorume é calculada em  $\text{m}^3/\text{dia}$  e se dá pela multiplicação da extensão da área operacional, em  $\text{m}^2$ , pelos índices, 0,0004 para resíduo coberto com solo argiloso; 0,0006 para resíduo coberto com solo arenoso e 0,0008 para resíduo descoberto.

Em relação ao tratamento do chorume, a técnica mais empregada é a de lagoas aeróbias, precedidas de peneiramento mecânico ou gradeamento manual, seguido de um tanque de equalização, onde o chorume fica retido, para a homogeneização de sua composição (Figura 13).

Figura 13 - Esquema de uma estação de tratamento de chorume com lagoas aeróbias



Fonte: Monteiro *et al.* (2001).

É recomendada a instalação de um conjunto de aeração superficial no tanque de equalização, com o intuito de realizar uma melhor homogeneização da massa líquida. As lagoas de estabilização possuem características básicas como formato em tronco-piramidal; profundidade de 1,5 metro e tempo de detenção de 25 dias, no mínimo (NASRAUI, 2016).

A entrada de chorume nas lagoas acontece por meio de uma tubulação dupla, que melhora o fluxo hidráulico dentro da própria lagoa, evitando assim, cantos mortos e curtos-circuitos. Por sua vez, a saída do efluente ocorre em vertedores de altura variável, garantindo que o chorume fique um tempo mínimo no interior das lagoas, independente da vazão afluente. Posteriormente, o efluente passa por um processo de polimento final em uma pequena lagoa, também aeróbia e com características semelhantes às lagoas anteriores, porém com capacidade de reter o chorume tratado por sete dias (NASRAUI, 2016).

Um cuidado que deve ser tomado na manutenção das lagoas é evitar que haja o crescimento de vegetação nas margens e na interface ar-efluente, uma vez que a mesma serve de abrigo para mosquitos ou outros vetores. A remoção do lodo deve ser realizada de forma periódica com o intuito de não interferir na eficiência do sistema de tratamento. O lodo removido deve ser seco em um leito de secagem e, em seguida, levado ao interior do aterro sanitário, enquanto a fração líquida pode ser descartada diretamente no corpo receptor (IBAM, 2001), desde que sejam atendidos os padrões de qualidade de efluentes, estabelecidos pela Resolução Conama no 430/2011.

Existem diversos fatores que influenciam na escolha do tipo de processo de tratamento de chorume. É necessário em geral um estudo detalhado de viabilidade técnica e econômica. As alternativas a serem consideradas processos biológicos aeróbios e anaeróbios e métodos

físicos e químicos, e até mesmo recirculação do chorume no próprio aterro em que ele é gerado, onde no caso, tal técnica compõe parte do tratamento e posteriormente, a aspersão do chorume sobre o solo como forma de disposição final (CALDAS, 2015).

Uma vez no processo de evaporação, o chorume é então transferido para um tanque metálico, que é o próprio evaporador, no qual é aquecido a uma temperatura entre 80 e 90°C, fazendo com que parte da fração líquida se evapore, concentrando o teor de sólidos do chorume. O vapor quente, passa em seguida por um filtro retentor de umidade e vai para uma câmara de aquecimento final, de onde é lançado, seco, na atmosfera. Finalmente, o lodo adensado, que contém geralmente cerca de 30% de material sólido, é eliminado pela parte inferior do evaporador e é vazado no aterro. A vantagem desse processo está em seu baixo custo operacional, pois o combustível utilizado para evaporar o chorume é o biogás captado no próprio aterro. Destaca-se também que, independente da alternativa de tratamento selecionada, o efluente deve atender aos padrões de qualidade para o lançamento em corpos d'água, conforme estabelece a Resolução Conama no 430/2011.

#### *Sistema de drenagem de águas pluviais*

A drenagem de águas pluviais em um aterro tem como principal objetivo evitar transtornos operacionais e também o aumento da produção de percolato. Comumente é utilizada uma solução simples, que consiste na execução de valetas com seção retangular ou trapezoidal, tendo declividade de fundo igual ou maior do que 2%, conduzindo a água precipitada para um ponto distante, de maneira que não cause problemas de estabilidade no aterro. Sendo assim, percebe-se a importância de que a drenagem do aterro seja realizada de maneira bem planejada e criteriosa. O sistema de drenagem deve ser mantido limpo e desobstruído, em especial nos trechos de travessias enterradas (IBAM, 2001).

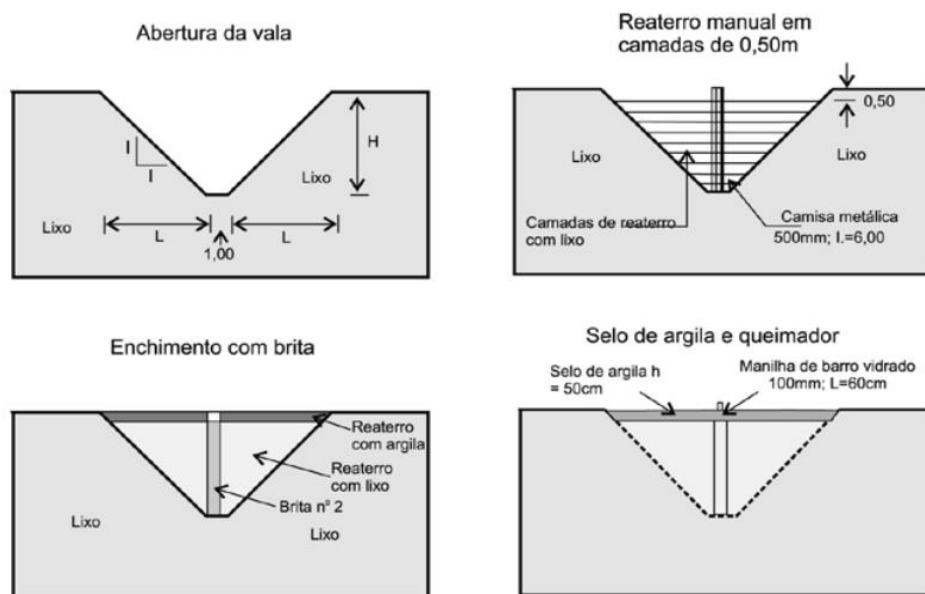
#### *Drenagem de gases*

Em um aterro sanitário, o gás é composto em geral por um conjunto de gases em quantidades e proporções variadas. Os gases presentes nos aterros de resíduos incluem o metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), amônia (NH<sub>3</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>), gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S), nitrogênio (N<sub>2</sub>) e oxigênio (O<sub>2</sub>). Dentre eles o dióxido de carbono e o metano são os mais recorrentes, oriundos da decomposição anaeróbia dos compostos biodegradáveis dos resíduos orgânicos (OBLADEN *et al.* 2007). A produção de biogás pode ser influenciada por fatores como a composição dos resíduos, da temperatura, tamanho das partículas, pH, projeto

do aterro, umidade, tipo e idade dos materiais (MMA, 2020). Usualmente, o registro de metano pode ser feito ainda nos três primeiros meses após a disposição dos resíduos

A estrutura de drenagem dos gases em um aterro é composta por poços instalados na vertical. Os sistemas são construídos em brita ou rachão, conforme apresenta a Figura 14. O método de execução dos drenos pode variar, sendo uma das necessidades a elevação do dreno à medida que as camadas do aterro vão se sobrepondo e aumentando de altura (IBAM, 2001). O manual também destaca a possibilidade de escavar a célula aterrada para a implantação do dreno. Quando aberto o poço, num raio de aproximadamente dois metros, o solo ao seu redor deve ser aterrado com uma camada de argila de cerca de 50 cm de espessura, com o intuito de evitar que o gás se disperse na atmosfera. Em conclusão, na parte superior do poço deve ser instalado um queimador, normalmente constituído de uma manilha de concreto ou de barro vidrado colocada na posição vertical. Vale ressaltar que o sistema de drenagem de gases deve ser monitorado permanentemente, de forma a manter os queimadores sempre acesos, principalmente, em dias de vento forte (OBLADEN *et al.* 2007).

Figura 14 - Exemplo de instalação e configuração de um sistema de drenagem de gás



Fonte: Monteiro *et al.* (2001).

Reichert (1997) destaca ainda a possibilidade de interligação dos drenos de biogás com o sistema de drenagem de percolado, de maneira que o líquido produzido ao longo da massa de resíduos direciona-se ao sistema de drenagem de lixiviados através do sistema de drenagem de gases. Em geral tais drenos são constituídos por tubos de concreto perfurado ou

PEAD (CONSILIU, 2008), associados a dispositivos de queima do biogás coletado, impedindo a emissão dos gases de efeito estufa e de emanações odoríferas diretamente na atmosfera.

#### *Condições para dispensa do sistema de drenagem de gases*

A NBR 15849:2010 estabelece ainda recomendações sobre a instalação do sistema de drenagem de gases, levando em conta a altura final do aterro e a porcentagem de matéria orgânica dos resíduos (Tabela 3).

Tabela 3 – Instruções para avaliar necessidade de sistema de drenagem de gases em aterros

Altura final do aterro (m)	$\leq 3$	$> 3$
Fração orgânica dos resíduos (%)	$\leq 30$	Dispensar
	$> 30$	Considerar

Fonte: Adaptação da NBR 15849 (2010).

#### *Monitoramento ambiental*

Antes mesmo do início das operações do aterro, o monitoramento dos corpos d'água no entorno da área deve ser realizado, para avaliar a qualidade inicial da água para comparação posterior à operação do aterro, o que é feito por meio da amostragem das águas superficiais e subterrâneas. Em um segundo momento de monitoramento ambiental, é realizada a amostragem do chorume gerado, analisando parâmetros de qualidade da água e do solo estabelecidos por órgãos ambientais (IBAM, 2001). Além disso, o monitoramento de parâmetros geotécnicos, do comportamento mecânico e da estabilidade durante a operação do aterro é obrigatório. Neste sentido, Aguiar (2019) destacou a importância do monitoramento para a identificação, em tempo hábil, das alterações no comportamento do maciço sanitário, fomentando a adoção de medidas proativas e evitando acidentes de qualquer natureza, que podem comprometer a integridade estrutural das células dos aterros.

#### *Monitoramento geotécnico e topográfico*

O acompanhamento topográfico acontece durante todo o processo de preenchimento das células do aterro, analisando-se a declividade de fundo dos drenos secundários e do coletor principal, para que haja o correto escoamento do chorume (IBAM, 2001). Aguiar (2019) apresentou os requisitos para um efetivo monitoramento geotécnico:

- O acompanhamento da velocidade e direção dos deslocamentos verticais e horizontais do maciço, utilizando marcos superficiais;

- O monitoramento do nível de líquidos e pressões dos gases dentro do aterro, com auxílio de piezômetros;
- O controle da compactação dos resíduos aterrados, por meio do acompanhamento das pesagens e do registro topográfico da frente de operação;
- Inspeções técnicas em campo para verificação visual de possíveis problemas nos sistemas drenagem, cobertura e outros;
- O acompanhamento de dados pluviométricos e de vazão de líquidos lixiviados, por meio de pluviômetro e medidor de vazão;
- Cálculo do fator de segurança de estabilidade dos taludes por meio de simulações matemáticas.

De acordo com o Manual do IBAM (2001), as leituras dos marcos e piezômetros devem ser realizadas mensalmente e em alguns casos semanalmente, dependendo do comportamento apresentado pelo aterro.

## 2.6 CRITÉRIOS PARA PRIORIZAÇÃO DE ÁREAS DE INSTALAÇÃO DE ATERROS

Quanto aos critérios para priorização de áreas para instalação de aterros, deve-se buscar soluções técnica e economicamente viáveis, que permitam reduzir o custo de operação e limitem a propagação de impactos socioambientais. Cunha e Consoni (1995) estabeleceram 5 etapas para o processo de seleção de áreas de instalação de aterros:

- Diagnóstico da situação atual dos resíduos sólidos na região de estudo e prognóstico da situação futura;
- Estudo geológico-geotécnico e ambiental para seleção de áreas;
- Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA);
- Estudo e definição de órgão gestor do empreendimento;
- Projeto de viabilidade técnica e econômica do aterro.

No Quadro 2 são apresentados os critérios para priorização de áreas de instalação de aterros, conforme Obladen *et al.* (2007).

Quadro 2 – Critérios para priorização de áreas de instalação de aterros em geral

<i>Critérios</i>	<i>Considerações</i>
<i>Menor custo de adequação do terreno</i>	<i>Necessidade de um volume elevado de corte e aterro, instalação de sistemas complexos de drenagem, impermeabilização e</i>

	<i>infraestrutura culminam em um custo de preparação mais expressivo.</i>
<i>Menor risco ambiental</i>	<i>A seleção de área de baixa vulnerabilidade ambiental reduz a necessidade de mitigação de impactos e os riscos de propagação de poluentes, além de fomentar a aceitação popular.</i>
<i>Menor custo operacional</i>	<i>A seleção de área com disponibilidade de materiais para uso no próprio empreendimento (tais como solo, cascalho entre outros) e a adoção de sistemas de monitoramento ambiental menos complexos e das condições naturais que auxiliam nos projetos (gravidade), garantem menor custo operacional.</i>

Fonte: Adaptado de Obladen *et al.* (2007).

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas IPT (1995) apresentou uma classificação de áreas mais adequadas para a instalação de aterros sanitários (Tabela 4), considerando os critérios apresentados no Quadro 2 para a priorização de áreas.

Tabela 4 – Critérios para seleção da área para instalação de aterros sanitários

Critérios	Classificação das Áreas		
	Recomendada	Recomendada com restrições	Não-Recomendada
Vida Útil	Maior que 10 anos	(10 anos, a critério do órgão ambiental)	
Distância do centro atendido	Maior que 10 km	10-20 km	Maior que 20 km
Zoneamento Ambiental	Áreas sem restrições no zoneamento ambiental		Unidades de conservação ambiental e correlatas
Zoneamento Urbano	Vetor de crescimento mínimo	Vetor de crescimento intermediário	Vetor de crescimento máximo
Densidade Populacional	Baixa	Média	Alta
Uso e Ocupação do solo	Áreas devolutas ou pouco utilizadas		Ocupação intensa
Valorização da Terra	Baixa	Média	Alta
Aceitação da população e entidades ambientais não-governamentais	Boa	Razoável	Inaceitável
Distância de cursos d'água	Maior que 200 m	Menor que 200 m, com aprovação do órgão ambiental responsável	

Fonte: IPT (1995).

## 2.7 MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE ATERROS

### 2.7.1 Método construtivo de Rampa

O método construtivo da rampa, encosta ou escavação progressiva é comumente empregado em áreas de encostas, sendo o rejeito depositado seguindo a declividade existente no terreno (ALBERTE *et al.*, 2005), como pode ser observado na Figura 15. A deposição dos rejeitos e solo é feita até que a célula em construção fique no mesmo plano do topo da encosta, na parte superior e, lateralmente, continue ainda em forma de rampa. Este método é indicado quando existe interesse em nivelar a área a ser aterrada e o solo apresenta boas condições de escavação, servindo de material de cobertura para as camadas de rejeito.



Figura 15 - Disposição final de resíduos em aterro com o método construtivo de rampa

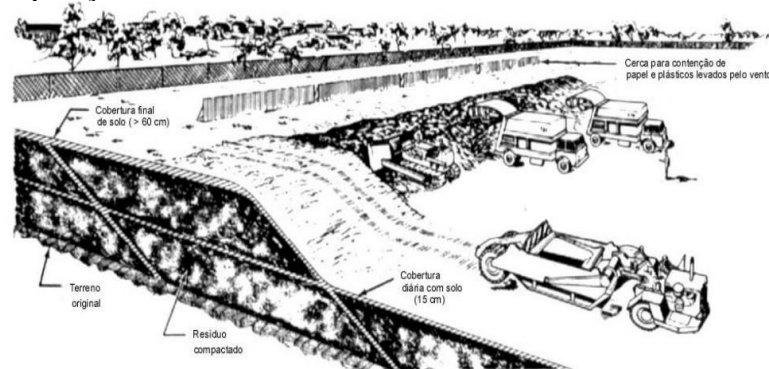


Fonte: Pinto (2010).

### 2.7.2 Método construtivo de Área

O método construtivo de área ou aterro superficial é comumente aplicado em zonas baixas, cuja topografia permite o recebimento e/ou confinamento dos resíduos, sem alteração da configuração natural (Figura 16). Normalmente o solo local não pode ser utilizado como material de cobertura, sendo necessária a retirada de solo de jazidas que, para economia de transporte, devem estar localizadas o mais próximo possível do local de instalação do aterro (MONTEIRO *et al.*, 2001). Em relação às células, estas devem apresentar altura variando de 3 a 5m, com inclinação suave, de modo a evitar possíveis deslizamentos e obter assim um maior grau de estabilidade à medida que o aterro se eleva. Em geral, este método é indicado para municípios de grande porte e apresenta procedimentos semelhantes ao modelo da rampa.

Figura 16 - Disposição final de resíduos em aterro com o método construtivo de área



Fonte: Gersina (2012).

### 2.7.3 Método construtivo de Trincheira/Vala

O método construtivo de trincheiras ou valas é indicado para terrenos planos ou levemente inclinados, cujo nível freático esteja situado em uma maior profundidade em relação à superfície (ALBERTE *et al.*, 2005). Como necessita de escavações para abertura das valas, tal método é inviável para terrenos rochosos e, em geral, utiliza-se o solo escavado para cobertura do terreno. Tal método é aplicado, sobretudo para municípios de pequeno a médio porte, cuja geração de resíduos não ultrapasse 20 t dia<sup>-1</sup>. Nos locais onde a disposição de resíduos estiver encerrada, deverá ser realizado o nivelamento final de forma “abaulada” e em cota superior à do terreno, para evitar o acúmulo de águas de chuva sobre a vala e prever possíveis recalques. A Figura 17 apresenta o esquema de um aterro em valas.

Figura 17 - Disposição final de resíduos em aterro com o método construtivo de valas



Fonte: Pinto (2010).

Ressalta-se que, se não houver escavações pré-existentes que possam ser aproveitadas para a construção do aterro, o processo de escavação acaba por apresentar um custo relativamente alto em relação aos demais métodos (CETESB, 2020). Desta forma, este método é utilizado principalmente em casos específicos, listados a seguir:

- Quando há interesse na obtenção de um excedente de solo;
- Quando se objetiva não alterar a topografia original do terreno, visto que com a sobreposição das camadas tem-se o preenchimento total da trincheira, devolvendo ao terreno sua topografia inicial;
- Quando se pretende construir outras camadas de resíduos acima das valas já aterradas, culminando em um melhor aproveitamento da área;
- Quando busca-se aterrar resíduos especiais, cuja composição química, biológica ou estado físico podem torná-los perigosos à saúde pública e ao meio ambiente.

#### 2.7.3.1 Procedimentos gerais de operação

De acordo com Lupatini (2002), os procedimentos para a operação dos aterros, independentemente do método selecionado, são semelhantes, destacando-se:

- Para a boa compactação, o espalhamento dos rejeitos deverá ser feito em camadas não muito espessas de cada vez e o trator deverá compactá-las de três a seis passadas;
- Para que a decomposição dos rejeitos aterrados ocorra em condições mais favoráveis, a altura da célula deve ser de 2 a 3 metros;
- A execução de uma célula em sobreposição à outra ou o recobrimento final dos rejeitos só deverá acontecer após um período de cerca de 60 dias;
- Recomenda-se uma camada de solo de cobertura de 20 a 30 cm para os recobrimentos diários da camada de rejeitos;
- A camada final de material de cobertura deverá apresentar, no mínimo, 50 cm de solo;
- Recomenda-se que a largura da célula seja a menor possível (em geral, suficiente para descarga de três a cinco caminhões coletores).

De acordo com a bibliografia consultada, a análise de parâmetros como a topografia da área, o tipo de solo e a profundidade do nível freático é necessária para a determinação do método construtivo a ser empregado (Quadro 3).

Quadro 3 – Parâmetros a serem analisados na seleção do método construtivo de um aterro

<i>Parâmetros</i>	<i>Métodos Construtivos de Aterros Sanitários</i>		
	<i>Rampa</i>	<i>Área</i>	<i>Trincheira/Vala</i>
<i>Relação com o nível do terreno</i>	<i>Acima</i>	<i>Acima</i>	<i>Abaixo</i>
<i>Topografia</i>	<i>Recomendado para terrenos que apresentam topografia acidentada.</i>	<i>Recomendado em locais de topografia plana e zonas baixas (LUPATINI, 2002).</i>	<i>Recomendado para terrenos que sejam planos ou levemente inclinados.</i>
<i>Solo</i>	<i>Solo com boas condições para ser escavado e utilizado como material de cobertura.</i>	<i>O solo utilizado como material de cobertura é trazido de outras áreas.</i>	<i>Terrenos rochosos não são indicados devido às dificuldades de escavação, bem como, solos arenosos (não apresentam a coesão necessária, com desmoronamento das paredes das valas). A cobertura dos resíduos, geralmente, é feita com o solo resultante da escavação da própria trincheira, que permanece estocado nas mediações (LUPATINI, 2002).</i>
<i>Profundidade do nível freático (aquífero)</i>	<i>Áreas secas</i>	<i>Nível freático raso</i>	<i>Lençol freático profundo, com distância mínima recomendada de 3 m entre o nível freático e o fundo da trincheira (SINDUSCON, 2005).</i>
<i>Operação</i>	<i>Os resíduos são dispostos junto à base de um desnível existente no terreno e em seguida são compactados por trator esteira. Essa operação ocorre até a célula ficar no mesmo plano do topo da encosta e lateralmente continuar em forma de rampa. A operação se repete até ocupar toda a área (ReCESA, 2008).</i>	<i>As camadas de resíduos compactados são distribuídas acima do nível original do terreno e cobertas ao final do dia, seguindo a mesma metodologia empregada nos demais métodos.</i>	<i>Pode-se aproveitar escavações pré-existentes ou realiza-se a abertura de valas para o aterramento. Em geral, para produção &lt; 10 t/dia, o espalhamento dos resíduos é realizado com equipamentos manuais, sem compactação. Para trincheiras de grandes dimensões, os resíduos são descarregados no interior das trincheiras e compactados mecanicamente (CETESB, 2010).</i>

Fonte: Compilado da literatura.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 METODOLOGIA

À princípio, foi realizada a revisão bibliográfica para a fundamentação técnica e científica do trabalho de graduação e obtenção de informações sobre o panorama da gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil. Neste sentido, foram destacados os objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei 12.305/2010, a classificação de resíduos pela NBR 10004/2004, as alternativas de destinação de resíduos em Pontos de Entrega Voluntária (PEVs), Áreas de Transbordo e Triagem (ATTs), Usinas de Reciclagem e a disposição de rejeitos em diferentes tipos de aterros sanitários.

Neste aspecto, foram analisadas as exigências da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, para localização, projeto, construção, operação, monitoramento e encerramento dos aterros de resíduos industriais, aterros sanitários, aterros de resíduos não perigosos e não inertes e aterros de resíduos não perigosos e inertes, estabelecidas pelas normas NBR 10.157/1987 para aterros de resíduos perigosos, NBR 13.896/1997 para aterros de resíduos não perigosos; NBR 15.849/2010 para aterros sanitários de pequeno porte e a NBR 15.113/2004 para aterros de resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes.

Após a avaliação das normas da ABNT, foi realizada uma análise comparativa entre as técnicas construtivas dos diferentes aterros e as diferentes funções dos geossintéticos aplicados em diferentes etapas do processo de aterramento. Também foram analisadas comparativamente, as técnicas construtivas aplicáveis aos aterros industriais, sanitários e de inertes, considerando os métodos de trincheira/vala, de rampa e de área.

Posteriormente, foram apresentados dois projetos, um de aterro sanitário de pequeno porte e outro de um aterro de inertes, enfatizando os métodos construtivos indicados e os geossintéticos recomendados para atender as funções de cada um deles. Para isso, foi considerado um município de pequeno porte, considerando que mais de 70% dos municípios brasileiros apresentam população de até 20 mil habitantes (IBGE, 2019).

Neste estudo, os projetos do aterro sanitário e de inertes atenderam um município com população de 20.000 habitantes, com uma taxa de crescimento populacional de 0,80% ao ano, com 80% de cobertura pelo serviço de coleta municipal, cuja geração per capita de rejeitos é de 1 kg hab.<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> (ABRELPE, 2019), sendo o peso específico dos rejeitos compactados no aterro de 0,6 t m<sup>-3</sup> e o recalque máximo da massa de resíduos após a decomposição de

30% (adotado com base na produção de um município de pequeno porte como Piranguinho - MG). O tempo de vida útil do aterro sanitário será de 25 anos.

Para a estimativa de geração diária de resíduos de construção civil (inertes), foi considerado o valor mínimo (0,80 kg hab<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>) da variação observada por Pinto (1999) de 0,80 a 2,64 kg hab<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, por se tratar de um município de pequeno porte e a finalidade deste aterro será a de reserva dos resíduos para posterior aproveitamento na forma de agregados reciclados gerados dos resíduos de classe A reutilização dos resíduos em obras de construção civil.

Para a seleção das áreas adequadas à instalação dos aterros, em especial, do aterro sanitário de pequeno porte, foi realizada uma análise dos parâmetros:

- Distância mínima de 500 m de residências isoladas e 2000m de comunidades;
- Distância mínima de 200 m de corpos d'água;
- Solo com 3 m de espessura e coeficiente de permeabilidade  $10^{-6}$  cm s<sup>-1</sup>, sendo aceitável a distância mínima entre a base do aterro e a cota máxima do aquífero de 1,5 m para solo com coeficiente de permeabilidade de  $5 \cdot 10^{-5}$  cm s<sup>-1</sup>.
- Camada de solo > 1,5 m entre o fundo do aterro e o nível mais alto do aquífero;
- Declividade < 20% no terreno
- Distância do centro atendido: de forma geral, menores distâncias entre geradores (centro atendido) e a área do aterro tendem a gerar economia no transporte, diminuição na possibilidade de contaminação por perda de material pelo caminho e facilitação do processo de transporte-disposição (favorecendo a logística e estratégia da gestão de resíduos).

Para a elaboração dos projetos de aterro sanitário e de inertes, foram considerados os sistemas operacionais dos diferentes métodos construtivos. No Quadro 4 são apresentadas as recomendações e as limitações dos métodos construtivos de rampa, área e vala/trincheira, para os aterros de resíduos industriais, sanitários e de inertes. Com base nestas recomendações, foi selecionado o método construtivo de vala/trincheira para os dois projetos de aterro, considerando que este é o mais recomendado para municípios de pequeno porte, terrenos planos e de solos profundos, como é o caso da classe dos Latossolos.

Os Latossolos são solos minerais, homogêneos, com pouca diferenciação entre os horizontes ou camadas, sendo facilmente reconhecidos pela cor, quase homogênea do solo com a profundidade. Os Latossolos são profundos, bem drenados e com baixa capacidade de troca de cátions, com textura média ou mais fina (argilosa a muito argilosa), sendo pouco férteis. Nos projetos de aterros em valas os Latossolos são os mais indicados por atenderem aos parâmetros relacionados à profundidade do solo e coeficiente de permeabilidade,

considerando que a distância mínima entre a base do aterro e a cota máxima do aquífero deve ser de 1,5 m para solo com coeficiente de permeabilidade de  $5 \cdot 10^{-5}$  cm s<sup>-1</sup>.

Quadro 4 – Sistema operacional de aterros em diferentes métodos construtivos

Método Construtivo	Aterro		
	Industrial	Sanitário	Inertes/RCD
Rampa	-----	<i>Este aterro resulta em uma área plana, que pode facilmente ser aproveitada para uso futuro, como parques, praças esportivas, campos de futebol etc. (IPT, 1995). Dessa forma, pode-se recuperar a área para uso da comunidade, para lazer e outras atividades.</i>	-----
Área	<i>Este método construtivo é comumente aplicado em regiões de nível freático raso (FUNASA, 2014), por isso, deve-se atentar à periculosidade do resíduo, para evitar a contaminação de recursos hídricos em caso de deficiência na impermeabilização e drenagem de líquidos.</i>	<i>Para suprir a demanda dos grandes centros urbanos, onde a produção dos resíduos é alta, o método da área é recomendado, visto que permite fácil acesso de caminhões coletores, tratores compactadores e a disposição de grandes volumes de resíduos.</i>	<i>Como os resíduos inertes não reagem com o meio, o nível freático raso não é fator limitante.</i>
Vala	<i>De maneira contrária ao método da Área, a metodologia de Vala é recomendada para locais de lençol freático profundo (NETO, 2010). Devido a maior distância até o nível freático, tem-se portanto menor risco de poluição hídrica.</i>	<i>Devido às dificuldades de escavação das valas e sobretudo ao elevado custo de escavação, esta metodologia se mostra mais adequada para municípios de pequeno porte, onde o volume dos resíduos depositados é menor. Além disso, as condições são mais desfavoráveis para coleta e transporte do percolado, (ReCESA, 2008).</i>	<i>O aterro de resíduos inertes e RCD (classe A) visa a reservação de materiais segregados, tendo em vista o alto potencial de reciclabilidade e reutilização (Sinduscon, 2005). A separação dos materiais em valas permite a deposição dos RCD inertes no solo, de forma a possibilitar a utilização futura desses materiais ou o uso futuro dessa área, sendo portanto o método mais adequado.</i>

Fonte: Compilado da literatura.

## 3.2 DIMENSIONAMENTO DAS ÁREAS DOS ATERROS

### 3.2.1 Projeto de aterro sanitário de pequeno porte

Considerando o número de 20.000 habitantes (população atual), a geração per capita de rejeitos (kg hab.-1 dia-1) e a taxa de cobertura dos serviços de coleta (80%), foi possível obter a massa de rejeitos diária (t dia-1) gerada no primeiro ano de operação do aterro, pela equação 1:

Massa de rejeitos (t dia-1) = (pop. atual x geração per capita x cobertura de coleta municipal)/1000 (1)

A relação da massa de rejeitos (t dia-1) com seu peso específico (t m-3) resultou no volume diário de rejeitos (m<sup>3</sup> dia-1) a ser enviado ao aterro sanitário, conforme equação 2:

Volume de rejeitos (m<sup>3</sup>dia-1) = Massa de rejeitos (t dia-1)/peso específico (t m-3) (2)

A partir do segundo ano de operação do aterro, passou a ser considerada a taxa de crescimento populacional de 0,8% a.a., conforme equação 3:

$$\begin{aligned} \text{População}_{2 \text{ ano}} &= \text{População atual} \times (1 + 0,0080)^2 \\ \text{População}_{10 \text{ ano}} &= \text{População atual} \times (1 + 0,0080)^{10} \\ \text{População}_{25 \text{ ano}} &= \text{População atual} \times (1 + 0,0080)^{25} \end{aligned} \quad (3)$$

Após a estimativa da população a ser atendida a cada ano, foram realizados os cálculos de massa diária de rejeitos (t dia-1) e o volume diário de rejeitos (m<sup>3</sup>dia-1), para o segundo ano até o vigésimo quinto ano, conforme as equações 1 e 2. Para o cálculo das massas e volumes de rejeitos anuais, os valores diários foram multiplicados por 365 dias. E, a partir da soma do volume gerado ano a ano, foi obtido o volume acumulado ao longo dos anos de operação do aterro.



Para o cálculo da área a ser aterrada mensalmente no primeiro ano de operação do aterro sanitário, foi considerada a altura de 5m de vala e o volume de resíduos gerados por mês (30 dias), sendo aplicada a equação 4 e, posteriormente, para o dimensionamento da vala foi aplicada a equação 5:

$$\text{Volume mensal (m}^3 \text{ mês}^{-1}) = \text{Área (m}^2) \times \text{Altura (m)} \quad (4)$$

$$\text{Área (A)} = \text{Comprimento (C)} \times \text{Largura (L)}, \text{ adotando a relação: } C = 3 \times L \quad (5)$$

Na projeção das valas, o volume de solo correspondeu à 20% do volume dos rejeitos, sendo utilizado o próprio solo retirado na abertura das valas para o recobrimento das camadas de rejeitos compactados, uma vez que os Latossolos são argilosos e bem estruturados, apresentando excelente potencial de uso no processo de aterramento.

Também que foi considerado o recalque de 30% da massa de resíduos após a decomposição, sendo aplicadas as equações 6 e 7.

$$V_T = V_R + V_S \cdot P_{vs} \quad (6)$$

$$V_T = (M_{RA}) / (\rho_R \cdot (1 - p_{vs})) \quad (7)$$

Onde:

VT: volume total do aterro (m<sup>3</sup>)

VR: volume de rejeitos compactados (m<sup>3</sup>)

VS: volume total de solo (m<sup>3</sup>)

P<sub>vs</sub>: percentual volumétrico de solo a ser empregado na cobertura (20%)

M<sub>RA</sub>: massa de rejeitos gerados anualmente (t)

ρ<sub>R</sub>: massa específica dos rejeitos aterrados e compactados (0,6 t m<sup>-3</sup>)

A partir das equações 6 e 7 foi elaborada uma planilha de cálculo, que permitiu determinar o volume de rejeitos aterrado anualmente e acumulado e de solo, bem como, a área ocupada anualmente e ao final dos 25 anos de operação do aterro.

Para a seleção dos geossintéticos a serem empregados no aterro sanitário foram consideradas as funções desempenhadas apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 – Geossintéticos aplicados no aterro sanitário

<i>Geossintético</i>	<i>Tipo</i>	<i>Função</i>
<i>Geotêxteis</i>	<i>Não tecidos: camada de separação, proteção da geomembrana, drenagem e filtração de percolato e controle de erosão.</i>	<i>Melhora a qualidade dos aterros, ampla utilidade, atende diferentes fases dos aterros.</i>
<i>Geogrelhas</i>	<i>Em contexto de necessidade de reforço de talude abaixo dos resíduos ou em caso de reforço dos solos de cobertura sobre geomembranas.</i>	<i>Reduz impacto ambiental por diminuição de emissões gasosas</i>
<i>Geomembranas</i>	<i>PEAD: Barreiras para líquidos, gases e/ou vapores, direcionando e controlando a migração de fluidos nos sistemas. PVC: utilizadas na cobertura final dos aterros, devido excelente qualidade mecânica no quesito de elasticidade, flexibilidade e facilidade de instalação.</i>	<i>Confere segurança ambiental aos aterros, bastante utilizada em todos os tipos de aterro.</i>
<i>Georredes e geocompostos drenantes</i>	<i>Georredes seu uso em aterros sanitários consiste principalmente em sistemas de drenagem.</i>	<i>Possibilita captação e tratamento de efluentes, gerando estabilidade e segurança, reduzindo impacto ambiental</i>
<i>Geomantas</i>	<i>Comumente utilizadas para o controle de erosão superficial em taludes de aterros sanitários</i>	<i>Principal aspecto é de impermeabilização e controle de erosão.</i>
<i>Geocompostos</i>	<i>Responsável por agir como um filtro, retendo partículas de solos e resíduos, também atuando na proteção mecânica e drenagem de líquidos e gases.</i>	<i>Conferem maior segurança aos aterros. Diminui emissão de poluentes vindos do uso de argila.</i>
<i>Geocélula</i>	<i>É utilizada na camada de fechamento, por conta de seu aspecto de durabilidade, alta resistência e estabilidade anti-raios UV.</i>	<i>Facilidade de aplicação, fechamento e reforço.</i>
<i>Geotubos</i>	<i>Podem ser utilizados nos aterros sanitários para coleta e drenagem de chorume, além de encaminhá-lo aos locais corretos de tratamento.</i>	<i>Maior segurança e menor impacto ambiental.</i>

Fonte: Autoras.

### 3.2.2 Projeto de aterro de inertes

Este aterro terá a função de reserva de resíduos da construção civil de classe A, para posterior reciclagem na forma de agregados reciclados. Como se trata de uma análise comparativa das necessidades construtivas de aterros sanitários e de inertes, foi mantido o número de 20.000 habitantes (população atual), a geração per capita de resíduos de construção civil (kg hab.-1 dia-1), a taxa de cobertura dos serviços de coleta (80%) e o peso específico destes resíduos. A massa e o volume dos resíduos da construção civil gerados diariamente, no primeiro ano de operação do aterro de inertes, foram obtidos aplicando as mesmas equações utilizadas no dimensionamento do aterro sanitário, bem como, a estimativa de crescimento populacional para os cálculos, a partir do segundo ano de aterramento dos resíduos, utilizando o modelo construtivo de vala de 5 metros de profundidade.

Para a realização dos cálculos foi elaborada uma planilha no excel, que permitiu determinar o volume aterrado anualmente, destacando a diferença entre o aterro sanitário e o

de resíduos inertes, quanto ao volume de solo, considerando que no caso do aterro de inertes não é necessária a cobertura intermediária com solo, como ocorre com o aterramento sanitário, uma vez que os resíduos de construção civil de classe A, serão armazenados para posterior aproveitamento na produção de agregados reciclados. Além do dimensionamento projetado para uma vida útil de 25 anos de operação, também foram indicados os geossintéticos com diferentes funções, aplicados na etapa de preparação das valas para recebimento de resíduos e no fechamento do aterro de inertes (Quadro 6).

Quadro 6 – Aplicações de geossintéticos em aterros de inertes

<i>Geossintético</i>	<i>Aplicação em aterros</i>	
	<i>Inertes/RCD</i>	<i>Geral</i>
<i>Geotêxteis</i>	<i>Proteção dos raios UV em aterros de resíduos inertes.</i>	<i>Melhora a qualidade dos aterros, ampla utilidade, atende diferentes fases dos aterros.</i>
<i>Geogrelhas</i>	<i>Utilização em reforço de base.</i>	<i>Reduz impacto ambiental por diminuição de emissões gasosas</i>
<i>Geomembranas</i>	<i>Mais utilizado como barreira impermeável.</i>	<i>Confere segurança ambiental aos aterros, bastante utilizada em todos os tipos de aterro.</i>
<i>Georedes e geocompostos drenantes</i>	<i>Utilizados em drenagem de plano inclinado.</i>	<i>Possibilita captação e tratamento de efluentes, gerando estabilidade e segurança, reduzindo impacto ambiental</i>
<i>Geomantas</i>	<i>Finalidade de impermeabilização inferior em, camada dupla.</i>	<i>Principal aspecto é de impermeabilização e controle de erosão.</i>
<i>Geocompostos</i>	<i>Betuminosos: substituir a argila compactada. Bentonita para impermeabilização de talude.</i>	<i>Conferem maior segurança aos aterros. Diminui emissão de poluentes vindos do uso de argila.</i>
<i>Geocélula</i>	<i>Utilizado em talude reforçado com geogrelhas e face em geocélulas</i>	<i>Facilidade de aplicação, fechamento e reforço.</i>
<i>Geotubos</i>	<i>Camadas drenantes inferiores, junto à camada de brita e em combinação à um geotêxtil.</i>	<i>Maior segurança e menor impacto ambiental.</i>

Fonte: Autoras.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 PROJETO DE ATERRO SANITÁRIO DE PEQUENO PORTE**

De acordo com a NBR 15849 (ABNT, 2010), os aterros sanitários de pequeno porte foram idealizados para assumir uma estrutura simplificada, considerando-se também a necessidade de não gerar passivos ao meio ambiente. Silveira (2008) destaca que este modelo atende grande parte dos municípios brasileiros de pequeno porte, com população de até 20.000 habitantes, devido ao baixo custo de implantação e operação, quando comparado aos de grande porte. Somado à simplificação técnica, os aterros de pequeno porte dispõem também de procedimentos facilitados quanto ao licenciamento ambiental, levando-se em conta os critérios apresentados pela Resolução Conama no 404/2008.

Um dos grandes desafios para os municípios de pequeno porte, ligado à escassez de recursos técnicos e financeiros para a construção de aterros, é a pouca disponibilidade de equipamentos para a sua operação. Por exemplo, os tratores de esteiras, comumente utilizados no processo de aterramento, possuem um elevado custo de aquisição e de manutenção, cuja relação de custo-benefício deve ser levada em conta. A capacidade de operação diária dos tratores também deve ser analisada, pois caso o município gere uma quantidade de resíduos muito inferior a este limite, haverá ociosidade dos equipamentos, tornando a operação mais onerosa. A seguir são descritos os elementos que devem compor um projeto de aterro sanitário.

#### **4.1.1 Sequência de abertura e fechamento das trincheiras**

De acordo com o manual para implantação de aterro em trincheiras do Instituto Ambiental do Paraná (IAP, 2006), inicialmente a trincheira deverá ser aberta de montante para jusante de maneira consecutiva, visando uma capacidade para receber o volume de resíduos produzidos no período de 60 a 180 dias, segundo o dimensionamento de projeto. Após a abertura das valas e iniciada a operação diária, é importante que se faça o controle do recebimento dos resíduos, por meio de classificação e pesagem de todos os caminhões que entram no aterro, respeitando os limites previstos. Em suma, os resíduos devem ser descarregados na vala pelo veículo coletor, em marcha ré, cujo acesso se dá por uma rampa de cerca de 15% de inclinação. Em seguida, conta-se com o auxílio de uma pá carregadeira (mínimo de 3 vezes por semana), para empilhar os resíduos coletados e cobri-los, liberando

então a frente de descarga. Ressalta-se que o próprio solo escavado na abertura da vala (acumulado em um dos lados) será utilizado como material de cobertura, reduzindo assim os custos de operação e transporte de material. Este manual prevê ainda a necessidade de compactação e a aplicação de geossintéticos, para otimizar o uso da área e evitar o contato com as águas da chuva, reduzindo assim, a produção de chorume. O detalhamento dos procedimentos de compactação, dos sistemas de drenagem e das camadas de cobertura são descritos a seguir.

#### **4.1.2 Procedimento de compactação**

Com base nos parâmetros a serem analisados na seleção do método construtivo de um aterro, com recebimento diário de resíduos de 10t simplifica-se uma série de procedimentos para o licenciamento ambiental, dispensando-se a utilização de equipamentos custosos, bem como a etapa de compactação. Neste contexto, como descreve IWAI (2007), é válido observar que quando os resíduos são confinados sem compactação, não se pode aproveitar integralmente a área aterrada, o que pode acarretar na abertura constante de novas valas, impactando diretamente no custo final da obra, tornando-a inviável.

Outro fator imprescindível a ser levado em conta são as dimensões da trincheira, pois estas definirão tanto a forma de operação, quanto os equipamentos a serem utilizados. Assim, quando a largura da vala permite a passagem de trator esteira, considerando a largura do veículo de aproximadamente 3m, a compactação é realizada com 5 a 6 passadas sobre a camada de resíduos. Para certos casos em que o município possui escavadeiras hidráulicas, as próprias caçambas podem ser utilizadas na compactação. Contudo, quando o município não conta com os equipamentos acima listados, a abertura da vala vizinha pode ser executada de tal forma que o solo escavado seja acumulado sobre a vala já aterrada, acelerando dessa forma os recalques e favorecendo a compactação dos resíduos.

No projeto proposto foi calculada a produção diária de resíduos de 16 t dia-1, sendo necessária a compactação, e como a largura da vala é de 7,48m, é possível a utilização de trator esteira na compactação dos resíduos.

### **4.1.3 Camada de proteção: impermeabilização de fundo, reforço, filtração e separação**

Conforme Neto (2007), para garantir a segurança das células de forma a proteger o solo e os aquíferos de possíveis infiltrações de líquidos lixiviados através da massa de resíduos, a impermeabilização da base é de extrema importância. Além disso, é necessário que esse sistema apresente características fundamentais como, durabilidade, estanqueidade, resistência mecânica e às intempéries e compatibilidade química, física e biológica com os resíduos que serão depositados no aterro (CEMPRE, 2010).

Considerando as propriedades intrínsecas dos Latossolos, a impermeabilização de base selecionada para este projeto teve como fundamentação o sistema proposto por Boscov (2008), formado por uma camada de solo compactado de cerca de 50 cm de espessura e de uma geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) de 2 cm de espessura. Este autor esclarece que o procedimento de execução do revestimento de fundo deve ser executado de maneira rigorosa para garantir a sua qualidade e durabilidade.

Sobre a geomembrana, com o intuito de proteger a interface geomembrana-resíduos, como é proposto no modelo de Buscov (2008), optou-se por utilizar um geotêxtil não tecido para garantir, também, a proteção mecânica.

Conforme Suzuki (2012), para garantir a estabilidade, no reforço da base, adotou-se a utilização das geogrelhas sobre a camada de argila compactada, em toda a interface solo-geomembrana. Outro critério que contribuiu para a escolha do geossintético, foi o fator ambiental de redução das emissões de gases e de partículas sólidas para a atmosfera, como descrito por Duarte (2009).

Antes de receber a camada de resíduos e, seguindo o modelo proposto, a camada de filtração e separação deverá ser composta por um sistema de georrede + geocomposto que terão a função de impedir a passagem de partículas, retendo os finos do solo e resíduos, conferindo maior segurança aos aterros.

Apesar da possibilidade de dispensa da impermeabilização de base em alguns casos de aterros sanitários de pequeno porte, conforme dispõe a NBR 15.849 (ABNT, 2010), para este projeto, em caráter didático, considerou-se necessária a execução da camada de proteção, para se discutir a relação entre os custos e a performance dos geossintéticos aplicáveis nas diferentes etapas de um aterro sanitário.

#### 4.1.4 Sistemas de drenagem

Para o sistema de drenagem de gases, objetivando a redução das pressões internas do maciço, devem ser implantados drenos verticais, que percorram desde a base até o nível de cobertura final do aterro, de forma que os gases menos densos (em especial, o metano), subam para a superfície, enquanto os de maior densidade, permanecem no fundo do aterro, sendo coletados juntamente com os efluentes líquidos, pelo sistema de drenagem de lixiviados (ALVES, 2015). Neste projeto, foi adotado o sistema interligado de coleta de biogás e chorume, proposto por Reichert (1997), visando reduzir o custo de construção e manutenção dos sistemas isolados de drenagem.

Levando-se em conta que se trata de um aterro sanitário para município de pequeno porte, e que a produção diária de biogás e chorume é relativamente reduzida, a aplicação do sistema interligado mostra-se mais viável. Dessa forma, o sistema de drenagem será composto por uma rede de drenos verticais interligados a drenos horizontais, dispostos na base do aterro sanitário e de maneira progressiva ao longo de sua operação, até o término da vida útil.

Devido à elevada deformabilidade da massa de resíduos, Boscov (2008) recomenda a implantação de um sistema de drenagem, constituído de material flexível, como colchões reno ou gabiões, visando proteger a área do aterro da infiltração das águas pluviais e evitar o desenvolvimento de processos erosivos da camada de cobertura. Para o projeto em questão, foi adotada a metodologia de colchões reno, por permitir o desenvolvimento da vegetação entre as pedras, de maneira que permite uma rápida integração da obra com o meio circundante. Além da melhoria estrutural, que garante a estabilidade para uso futuro da área, quando preenchidos com rochas, os colchões tornam-se elementos drenantes, cuja alta flexibilidade, permite a construção de revestimentos resistentes e econômicos, mesmo diante de recalques acentuados.

Como proposto por Maia (2016), neste projeto, o sistema de drenagem deverá encaminhar o percolado do aterro de pequeno porte até um tanque de armazenamento à jusante do maciço, onde os efluentes, posteriormente, serão transportados para uma Estação de Tratamento de Esgotos - ETE, propriamente licenciada, e em comum acordo entre os empreendedores do aterro e da ETE.

#### 4.1.5 Camada de cobertura

Gomes (2009) relatou sobre a importância do sistema de cobertura em aterros, destacando que esse sistema, além de controlar a proliferação de vetores de doenças, reduz a exalação de odores, impede a saída de biogás para a atmosfera e permite a diminuição da taxa de formação de lixiviados, favorecendo o escoamento das águas superficiais em detrimento da infiltração e possibilita a reabilitação da área. Neste contexto, a partir do estudo de Adisan (2008), optou-se pela cobertura dos resíduos diária e após o encerramento das atividades do aterro, conforme descrito a seguir.

- *Cobertura diária*: fina camada de solo, de aproximadamente 20 cm para selamento sanitário realizada diariamente, visando inibir a atração/disseminação de vetores; reduzir a propagação de odores derivados da decomposição da fração orgânica; evitar o transporte de resíduos leves pela ação do vento, como plásticos, papéis etc.; mitigar a produção de lixiviados e facilitar o acesso dos caminhões compactadores à célula de disposição de rejeitos. Maia (2016) recomendou que durante a operação do aterro, os rejeitos sejam espalhados e compactados por um equipamento apropriado.

- *Cobertura final*: camada definitiva de, no mínimo 60 cm de solo compactado, realizada quando da finalização da célula. Nota-se que essa cobertura tem a mesma finalidade da cobertura diária, destacando-se o seu caráter permanente e a necessidade de resistência à erosão, sendo bem comum o plantio de gramíneas que protegem contra o impacto direto das gotas de chuva e reduz a velocidade de infiltração, além de auxiliar no controle da propagação de gases.

#### 4.1.6 Monitoramento e análise de estabilidade

Quanto ao monitoramento do aterro, são recomendadas medições regulares nos piezômetros, da profundidade do nível de chorume, bem como da pressão de gás, além de inspeções no maciço e dos elementos acessórios, medições da pluviometria e da vazão de chorume gerada (ADISAN, 2009). Neste contexto, a elaboração de um gráfico mensal da variação da vazão de chorume, auxilia na análise da interferência das precipitações pluviométricas no volume de efluentes líquidos gerados e contribui para o monitoramento do desempenho do sistema de coleta de percolado, sua manutenção e adequação.



Para este projeto de aterro sanitário, recomenda-se o monitoramento geotécnico por meio de leitura periódica dos marcos superficiais, que deverão ser distribuídos em toda a superfície do aterro, permitindo a obtenção da velocidade de deslocamento do maciço, tanto no sentido vertical (possíveis recalques) quanto horizontal. Os critérios de avaliação das velocidades de deslocamento são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Critérios de avaliação das velocidades de deslocamento em aterro sanitário

Deslocamento vertical (mm dia <sup>-1</sup> )			
Adequado	Atenção	Alerta	Intervenção
$x \leq 20$	$20 < x \leq 40$	$40 < x \leq 100$	$x > 100$
Deslocamento horizontal (mm dia <sup>-1</sup> )			
Adequado	Atenção	Alerta	Intervenção
$x \leq 10$	$10 < x \leq 20$	$20 < x \leq 50$	$x > 50$

Fonte: Kaimoto (2008).

Desta forma, a gestão da condição geotécnica do maciço deverá ser tomada em consonância aos critérios de nível de alerta apresentados e da análise conjunta do histórico do comportamento da região, o que permitirá determinar se há movimentação que indique tendência ou até mesmo processos de instabilização.

#### 4.1.7 Encerramento do aterro

Com o intuito de atingir o equilíbrio ambiental a partir da recuperação da área degradada, o encerramento do aterro deve ser realizado a fim de minimizar os impactos provenientes da implantação e operação do sistema. De acordo com Souza (2007) um dos objetivos do encerramento do aterro deve ser a recuperação paisagística da área, sendo necessária a análise química do solo para selecionar as espécies vegetais mais adequadas ao solo e ao clima da região.

Quanto aos geossintéticos, a alternativa adotada foi a utilização da geomembrana de PVC, como o primeiro material a ser aplicado logo acima da última camada de resíduo, garantindo a impermeabilização e o controle de erosão. Esse geossintético é comumente utilizado na cobertura final dos aterros, devido à excelente resistência mecânica, elasticidade e flexibilidade e à facilidade de instalação.

Finalmente, será utilizada uma camada de geomanta, mais especificamente, a biomanta, que estará localizada acima da camada de solo, que por sua vez recobrirá a geomembrana de PVC. A biomanta tem sido indicada devido ao baixo impacto ambiental, por contribuir para

a manutenção da cobertura do aterro e permitir o desenvolvimento da cobertura vegetal, protegendo dos agentes erosivos na superfície do aterro impedindo o carreamento de sólidos durante os períodos intensos de chuva. Após o encerramento das operações nas valas, será realizado o monitoramento geotécnico e ambiental, bem como, uma rotina de manutenção, visando corrigir eventuais recalques, garantir o correto funcionamento dos sistemas de drenagem e realizar o aparo da grama tipo esmeralda.

#### **4.1.8 Dados quantitativos:**

Na Tabela 6, são apresentados os resultados de massa e volume de rejeitos a ser aterrado diariamente, anualmente e o volume acumulado, bem como, a área ocupada anualmente e a área total utilizada ao final dos 25 anos de operação do aterro sanitário, obtidos por meio dos cálculos de dimensionamento, aplicados ao modelo construtivo de valas (Apêndice A). O modelo construtivo de vala foi selecionado, por se tratar de um município de pequeno porte (20.000 habitantes), com disponibilidade de área plana e predomínio de Latossolos, que devido à elevada profundidade, reduz os riscos de contaminação do nível freático e por se tratar de um solo de textura argilosa, pode ser utilizado na cobertura intermediária das camadas de rejeitos compactados.

Para o cálculo do volume de solo necessário para a cobertura das camadas de rejeitos compactados, considerou-se que 80% da vala são ocupados com rejeitos e 20% com solo, como geralmente ocorre em projetos similares. Considerando o que vem sendo empregado na literatura, foi adotado o recalque de 30% da massa de resíduos após a decomposição.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 6 foi possível determinar que no primeiro ano, para o aterramento mensal de 840 m<sup>3</sup> de rejeitos municipais, as valas devem ter a dimensão de 168m<sup>2</sup> sendo: 7,48m de largura x 22,45m de comprimento x 5m de altura. No vigésimo quinto ano de vida útil, para o aterramento mensal de 1.050 m<sup>3</sup> de rejeitos municipais, as valas devem ter a dimensão de 210m<sup>2</sup> sendo: 8,37m de largura x 25,105m de comprimento x 5m de altura.

Como 80% de cada camada corresponde a resíduos compactados e 20% a solo de cobertura, dos 5 metros de altura de cada camada de rejeito+solo, sendo 4 metros ocupados com resíduos e 1 metro com solo.

Tabela 6 – Volume aterrado e área ocupada pelo aterro sanitário em 25 anos de vida útil

Ano	População nº hab.	Massa e Volume de rejeitos					Volume anual de rejeito + solo, m <sup>3</sup>	Área aterrada m <sup>2</sup> ano <sup>-1</sup>	Vol. de solo m <sup>3</sup>	VMS * m <sup>3</sup> dia <sup>-1</sup>	
		Massa a diária t dia <sup>-1</sup>	Massa anual t ano <sup>-1</sup>	Volu me diário m <sup>3</sup>	Volu m e anual m <sup>3</sup>	Volume acumula do m <sup>3</sup>					
1	20.000,00	16,00	5.840,00	26,67	10.220	10.220	8.584,80	1.716,96	2.044	28	
2	20.321,28	16,26	5.933,81	27,10	10.585	20.805	8.891,40	1.778,28	2.117	29	
3	20.483,85	16,39	5.981,28	27,31	10.585	31.390	8.891,40	1.778,28	2.117	29	
4	20.647,72	16,52	6.029,13	27,53	10.585	41.975	8.891,40	1.778,28	2.117	29	
5	20.812,90	16,65	6.077,37	27,75	10.585	52.560	8.891,40	1.778,28	2.117	29	
6	20.979,41	16,78	6.125,99	27,97	10.950	63.510	9.198,00	1.839,60	2.190	30	
7	21.147,24	16,92	6.174,99	28,20	10.950	74.460	9.198,00	1.839,60	2.190	30	
8	21.316,42	17,05	6.224,39	28,42	10.950	85.410	9.198,00	1.839,60	2.190	30	
9	21.486,95	17,19	6.274,19	28,65	11.315	96.725	9.504,60	1.900,92	2.263	31	
10	21.658,85	17,33	6.324,38	28,88	11.315	108.040	9.504,60	1.900,92	2.263	31	
11	21.832,12	17,47	6.374,98	29,11	11.315	119.355	9.504,60	1.900,92	2.263	31	
12	22.006,77	17,61	6.425,98	29,34	11.315	130.670	9.504,60	1.900,92	2.263	31	
13	22.182,83	17,75	6.477,39	29,58	11.315	141.985	9.504,60	1.900,92	2.263	31	
14	22.360,29	17,89	6.529,20	29,81	11.680	153.665	9.811,20	1.962,24	2.336	32	
15	22.539,17	18,03	6.581,44	30,05	11.680	165.345	9.811,20	1.962,24	2.336	32	
16	22.719,49	18,18	6.634,09	30,29	11.680	177.025	9.811,20	1.962,24	2.336	32	
17	22.901,24	18,32	6.687,16	30,53	11.680	188.705	9.811,20	1.962,24	2.336	32	
18	23.084,45	18,47	6.740,66	30,78	12.045	200.750	10.117,80	2.023,56	2.409	33	
19	23.269,13	18,62	6.794,59	31,03	12.045	212.795	10.117,80	2.023,56	2.409	33	
20	23.455,28	18,76	6.848,94	31,27	12.045	224.840	10.117,80	2.023,56	2.409	33	
21	23.642,92	18,91	6.903,73	31,52	12.045	236.885	10.117,80	2.023,56	2.409	33	
22	23.832,07	19,07	6.958,96	31,78	12.410	249.295	10.424,40	2.084,88	2.482	34	
23	24.022,72	19,22	7.014,64	32,03	12.410	261.705	10.424,40	2.084,88	2.482	34	
24	24.214,90	19,37	7.070,75	32,29	12.410	274.115	10.424,40	2.084,88	2.482	34	
25	24.408,62	19,53	7.127,32	32,54	12.775	286.890	10.731,00	2.146,20	2.555	35	
<b>TOTAL</b>							<b>48.197,52</b>	<b>57.378</b>			

\* VMS: volume diário adotado com margem de segurança para o dimensionamento das valas do aterro.

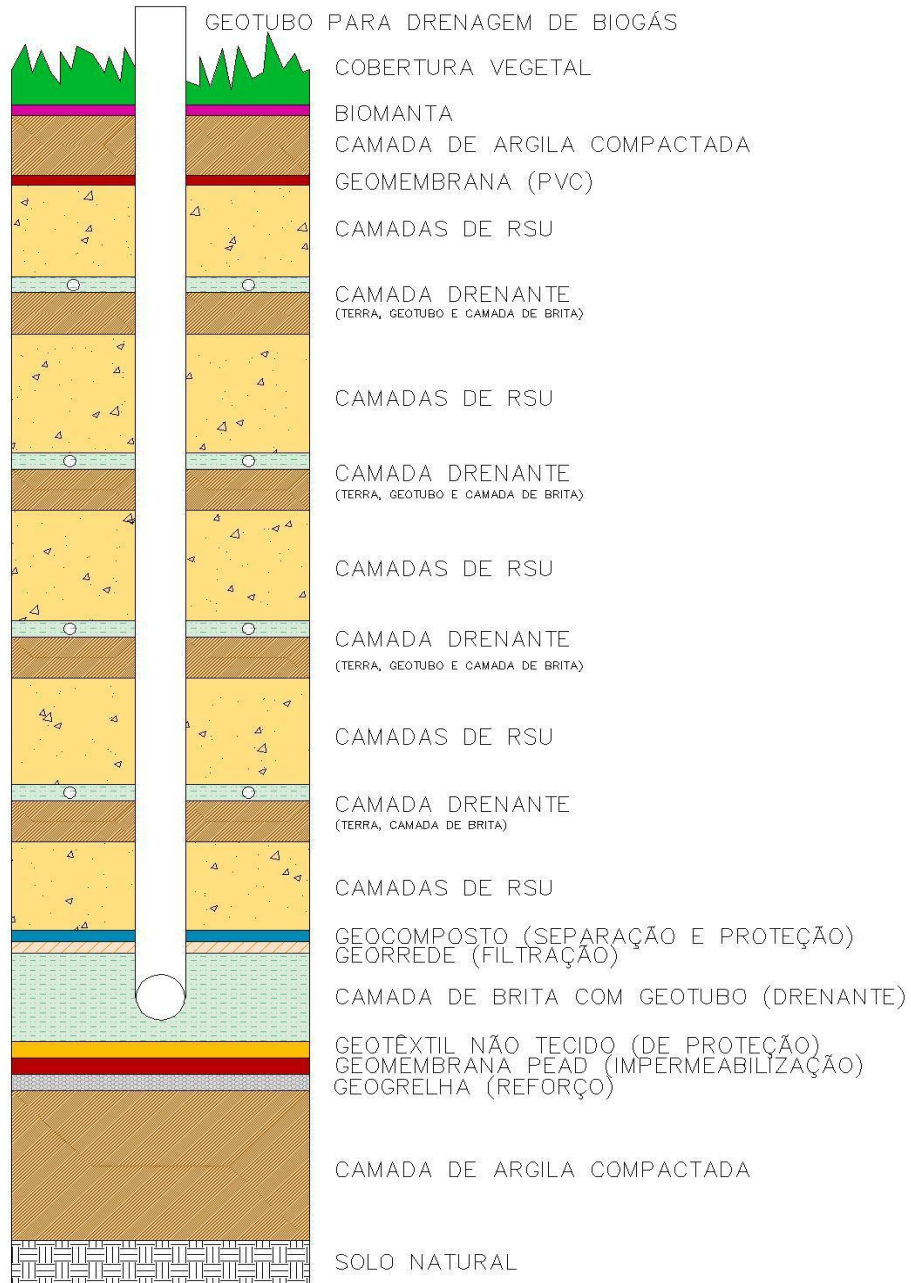
Fonte: Autoras.

#### 4.1.9 Croqui da distribuição de camadas no aterro sanitário

De acordo com o dimensionamento do aterro sanitário em valas, com os cálculos de volume de resíduos e de solos e, considerando os sistemas de drenagem de efluentes líquidos e gasosos e os geossintéticos adotados neste projeto, foi elaborado um croqui, contendo o

perfil de uma vala do aterro sanitário, apresentado na Figura 18, visando facilitar o controle das atividades, durante o período operacional do aterro.

Figura 18 - Distribuição de camadas no perfil de uma vala do aterro sanitário projetado.



Fonte: Autoras (2020).

## 4.2 PROJETO DE ATERRO DE INERTES

Conforme a NBR 15113 (ABNT, 2004), os aterros de resíduos sólidos da construção civil classe A e de resíduos inertes têm como principal objetivo a reservação de materiais de forma segregada, possibilitando seu uso futuro ou, ainda, a disposição destes materiais, com vistas à posterior utilização da área.

Considerando o grande potencial de reciclagem e de reutilização dos resíduos de construção civil e demolição (RCD), o método construtivo em trincheiras se mostra bastante eficiente e adaptado, atendendo às necessidades dos aterros de inertes, visto que permite a segregação dos resíduos em valas, que desempenham o papel de reservatório temporário. No projeto serão aplicadas as mesmas considerações do aterro sanitário para município de pequeno porte quanto à gestão dos recursos técnicos e financeiros, bem como, a disponibilidade de equipamentos. A seguir são apresentados os principais elementos constituintes do projeto de aterro de inertes.

### 4.2.1 Recebimento e triagem dos resíduos

Pinto e Gonzáles (2005), relatam que um dos grandes entraves para a correta gestão dos RCD é a frequente ausência de identificação e caracterização prévia dos resíduos pelo gerador na origem, o que dificulta o reaproveitamento e/ou reciclagem dos materiais, além de facilitar a contaminação dos resíduos por impurezas que podem inviabilizar sua reutilização. Os autores também destacam que, caso o controle do recebimento não seja feito com critério, pequenas quantidades de resíduos de outras classes e até mesmo não inertes acabam sendo dispostos indevidamente nos aterros, colocando em risco a saúde da população e o meio ambiente.

No projeto do aterro de inertes recomenda-se o estabelecimento de uma área de triagem no próprio empreendimento, de modo a garantir somente a disposição de RCD de classe A e inertes, respeitando as diretrizes normatizadas. Desta forma, após a chegada e o recebimento dos resíduos, se for constatado que estes não estão de acordo com a função do aterro, o material será devolvido ao cliente.

Os RCD após serem recebidos serão segregados em diferentes materiais como concreto, materiais cerâmicos, solo de terraplenagem e metais e dispostos em valas identificadas em projeto, facilitando assim a posterior retirada dos materiais, conforme necessidade. O projeto

também contará com uma usina de reciclagem, permitindo a valorização dos resíduos e sua reinserção no mercado.

#### **4.2.2 Camada de proteção: reforço e filtração**

A utilização de geossintéticos em um aterro de inertes está mais voltada para a proteção de topo, reforço de fundo e filtração, com o principal intuito de atuar como reforço de solo (caso haja necessidade) e também reter possíveis finos, que podem ser carregados pelas águas pluviais. Sendo assim, semelhante ao aterro sanitário, e de acordo com Suzuki (2012), para o reforço da base, foi projetada a utilização de geogrelhas sobre a camada de argila compactada, em toda a interface solo-geotêxtil. Outro critério que contribuiu para a escolha do geossintético, foi o fator ambiental como citado anteriormente, semelhante ao aterro sanitário, descrito por Duarte (2009). A geogrelha atua como filtro, para que caso haja infiltração nas valas, os finos carregados não atinjam ou afetem o meio e o solo natural.

#### **4.2.3 Sistemas de drenagem e monitoramento**

Como destacado por Cabral e Moreira (2011), diferentemente dos RSU dispostos em aterro sanitário, os resíduos inertes não exalam odores desagradáveis e nem promovem a formação de gases e de líquidos que lixiviam e, por isso, o aterro de inertes dispensa os sistemas de drenagem de gases e de chorume. Contudo, a Cetesb (2014) ressalta que deve ser previsto um sistema de drenagem de águas pluviais, com capacidade de suportar uma chuva com período de recorrência de cinco anos, levando-se em conta a drenagem local.

O sistema de drenagem superficial aplicado a um aterro de inertes é composto por fases ao longo de sua operação, que serão provisórias, dada a necessidade de reaproveitamento dos resíduos. Esse modelo atua no controle de escoamento superficial nas camadas em execução, evitando a infiltração e/ou erosão, que podem decorrer do escoamento causado pelas precipitações.

De acordo com Estudo de impacto ambiental do Centro de tratamento disposição adequada de resíduos sólidos de São Mateus realizado pela Secretaria de Saneamento, Habitação e Desenvolvimento Urbano Espírito Santo em parceria com o Consórcio Público da Região Norte – CONORTE (2010), tal sistema se resume na implantação de canaletas escavadas ao longo da camada de cobertura de cada célula, no contato com as ombreiras junto às bordas externas das células.

Em casos de ocorrência de chuvas intensas ou de longa duração, o estudo destaca a importância de ser realizado o monitoramento do sistema de drenagem e eventuais correções caso seja necessário. Em suma, recomenda-se inspeções periódicas do aterro e dos elementos acessórios, com medição da pluviometria e de eventuais recalques, avaliando-se os possíveis deslocamentos e, garantindo assim, a estabilidade e durabilidade da estrutura.

#### **4.2.4 Camada de cobertura**

Visando a economia de materiais e a redução dos custos de operação, propõe-se apenas a aplicação de uma cobertura temporária, quando da finalização da frente de serviço na vala, para evitar a infiltração das águas pluviais na massa de resíduos e para possibilitar a reabertura futura das valas para retirada dos resíduos.

O geossintético que melhor atende essa demanda específica e garante uma proteção ao longo da operação do aterro é a geomembrana de PEAD. O modelo de execução será composto pelo recobrimento das camadas sempre que a frente de trabalho de cada vala estiver parada. A espessura será de 0,5mm e o nome dado a esta estrutura é “manta de sacrifício”, propiciando economia no uso de material de cobertura intermediária e evitando o escoamento e a passagem das águas de chuva.

#### **4.2.5 Vida útil do aterro**

Um dos principais pontos a serem ressaltados quanto à operação dos aterros de resíduos inertes se dá pela sua vida útil, que está intimamente ligada ao reaproveitamento dos resíduos. Por exemplo, caso haja interesse das construtoras locais em utilizar agregados reciclados e seja possível a inserção de tecnologias que visem o tratamento dos RCD, reduz-se o volume de resíduos dispostos nas valas receptoras e, portanto, a vida útil do aterro é prolongada. Para o dimensionamento do projeto em questão, considerou-se que a cada 2 anos, todo o resíduo disposto no aterro será vendido como material reciclado ou matéria prima para a indústria, de forma a otimizar a área do aterro, maximizando sua capacidade e gerando lucros pela aplicação de valor aos resíduos.

#### **4.2.6 Dados quantitativos**

Como apresentado na revisão bibliográfica, o aterro de inertes permite uma configuração onde os resíduos sejam confinados no menor volume possível, a fim de permanecerem reservados até que seja atribuído um uso futuro (reciclagem ou reutilização). Levando-se esse fator em conta, na Tabela 7, são apresentados os resultados dos cálculos realizados, presentes no Apêndice B, sendo eles a massa diária e anual de resíduos inertes, o volume diário, anual e bianual destes resíduos, ao longo de 25 anos de operação do aterro (a título de comparação com o modelo de aterro sanitário, uma vez que não se pode estipular a vida útil de um aterro de inertes, devido à sua característica rotativa, de reservatório temporário por 2 anos). A altura adotada para as valas foi de 5m de deposição.



Tabela 7 – Volume de resíduos aterrado anualmente e acumulado a cada dois anos e área ocupada pelo aterro de inertes em 25 anos de vida útil

Ano	População nº habitantes	Massa e Volume de rejeitos				Volume acumulado m <sup>3</sup> (*)
		Massa diária t dia <sup>-1</sup>	Massa anual t ano <sup>-1</sup>	Volume diário m <sup>3</sup>	Volume anual m <sup>3</sup>	
1	20.000,00	12,80	4.672,00	10,00	3.650,00	
2	20.321,28	13,01	4.746,99	10,16	3.708,58	7.358,58
3	20.483,85	13,11	4.785,06	10,24	3.738,33	
4	20.647,72	13,21	4.823,37	10,32	3.768,26	7.506,59
5	20.812,90	13,32	4.861,92	10,41	3.798,37	
6	20.979,41	13,43	4.900,69	10,49	3.828,67	7.627,04
7	21.147,24	13,53	4.939,94	10,57	3.859,33	
8	21.316,42	13,64	4.979,42	10,66	3.890,17	7.749,50
9	21.486,95	13,75	5.019,36	10,74	3.921,38	
10	21.658,85	13,86	5.059,54	10,83	3.952,77	7.874,15
11	21.832,12	13,97	5.099,96	10,92	3.984,34	
12	22.006,77	14,08	5.140,84	11,00	4.016,28	8.000,62
13	22.182,83	14,20	5.181,95	11,09	4.048,40	
14	22.360,29	14,31	5.223,30	11,18	4.080,70	8.129,10
15	22.539,17	14,42	5.265,11	11,27	4.113,37	
16	22.719,49	14,54	5.307,16	11,36	4.146,22	8.259,59
17	22.901,24	14,66	5.349,67	11,45	4.179,43	
18	23.084,45	14,77	5.392,42	11,54	4.212,83	8.392,26
19	23.269,13	14,89	5.435,64	11,63	4.246,59	
20	23.455,28	15,01	5.479,09	11,73	4.280,54	8.527,13
21	23.642,92	15,13	5.523,00	11,82	4.315,85	
22	23.832,07	15,25	5.567,16	11,92	4.349,34	8.664,19
23	24.022,72	15,37	5.611,77	12,01	4384,20	
24	24.214,90	15,50	5.656,62	12,11	4.419,24	8.803,44
25	24.408,62	15,62	5.701,94	12,20	4.454,64	4.454,64

\* O valor acumulado é bianual, sendo reiniciado o cálculo assim que termina o segundo ano.

Fonte: Autoras.

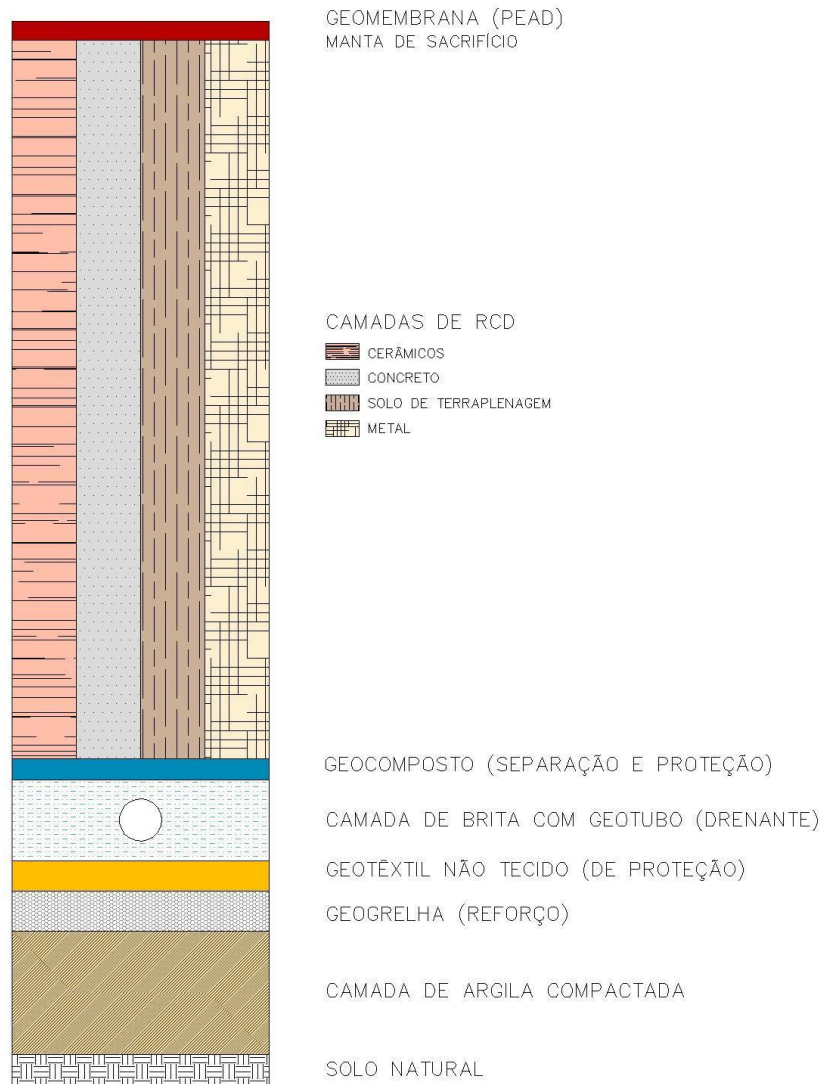
Observa-se que em média, a cada dois anos, para o aterramento mensal de 360m<sup>3</sup> de rejeitos inertes, as valas deverão ter a dimensão de 72m<sup>2</sup> sendo: 4,9m de largura x 14,70m de comprimento x 5m de altura. Vale destacar que com o passar do tempo a população crescerá, aumentando o volume bianual acumulado, sendo necessário também um aumento proporcional nas dimensões da trincheira. A possibilidade de reutilizar a vala a cada vez que

os resíduos forem retirados para reciclagem, evita o retrabalho e diminui os gastos operacionais, em especial, com reabertura de novas frentes de trabalho.

#### **4.2.7 Croqui da distribuição de camadas no aterro de inertes**

Analogamente ao modelo elaborado para o projeto de aterro de RSU, foi realizado um croqui contendo o perfil de uma vala do aterro de inertes, a partir do dimensionamento do volume de RCD dispostos, considerando ainda o sistema de drenagem de águas pluviais e os geossintéticos adotados no projeto (Figura 19).

Figura 19 - Distribuição de camadas no perfil de uma vala do aterro de inertes projetado.



Fonte: Autoras (2020).

A partir dos modelos elaborados, pode-se destacar as diferenças técnicas e construtivas entre os dois tipos de aterro apresentadas no Quadro 7.

Quadro 7 – Análise comparativa dos critérios e necessidades dos projetos de aterros sanitários e de inertes no sistema construtivo de valas

(continua)

Critério	Tipo de Aterro	
	sanitário	de inertes
Profundidade do nível freático	Mínimo: 3m entre o nível freático e fundo da vala. Coef. Perm. $10^{-6}$ cm/s. Aceita distância mínima de 1,5m para solo Coef. Perm. de $5 \cdot 10^{-5}$ cm/s	Distância mínima recomendada de 3 m entre o nível freático e o fundo da vala (SINDUSCON, 2005).
Distância mínima de núcleos populacionais	Distâncias mínima de 500 m de residências isoladas e 2000m de comunidades	Deve-se evitar grandes distâncias dos centros produtores para reduzir o custo com o transporte.
Distância mínima dos cursos d'água	Distância mínima de 200 m de corpos hídricos.	---
Possíveis riscos ambientais e à saúde pública	Água advinda de poços subterrâneos sem tratamento ou com tratamento ineficiente. Co-disposição irregular de resíduos sólidos municipais com os resíduos perigosos, industriais e/ou dos serviços de saúde (ACURIO et al., 1998). Vetores de doenças (DIAZ et al., 1996). Contaminação biológica e liberação de odores desagradáveis. Depreciação econômica da área de entorno (ACURIO et al., 1998).	Deterioração da paisagem urbana, disposição de não-inertes e o acúmulo de água (SCHNEIDER, 2003). Assoreamento de lagos, rios e córregos (CABRAL; MOREIRA, 2011). Alta demanda de recursos naturais, (CONAMA, 2002).
Drenagem de gases e chorume	Sim	Não
Necessidade de sistema de desvio e drenagem de águas pluviais	A água de chuva que cai sobre o aterro percola através do mesmo, carreando o chorume → aumento volumétrico que pode causar problemas à operação do aterro, bem como aumentar os riscos de contaminação dos solos e dos recursos hídricos (CHRISTENSEN et al, 2001).	Sistema capaz de suportar uma chuva com período de recorrência de cinco anos, compatibilizado com a drenagem local (CETESB, 2014). Devem ser definidas inclinações ou caimentos que permitam afastar o mais rápido possível as águas que precipitam sobre o aterro.
Monitoramento geotécnico	- Fase operacional: medida da poro-pressão nos diques e no interior das células de resíduos, recalques superficiais, medidas de permeabilidade, movimentações internas, controle tecnológico dos materiais geotécnicos utilizados e inspeções de campo; - Fase de encerramento: medida da poro-pressão nos diques e no interior das células de resíduos, recalques superficiais, movimentações internas e inspeções de campo (SIMÕES et al, 2006).	-Investigação geológica e geotécnica da área do aterro, que contribua para avaliação dos riscos de poluição das águas e das condições de estabilidade dos maciços (BR 15113/2004); - Para o monitoramento, a norma indica o mapeamento de superfície e a sondagem de simples reconhecimento com ensaio de percussão SPT, segundo os critérios da ABNT NBR 6484:2001, complementados com ensaio de permeabilidade do solo;

Quadro 7 – Análise comparativa dos critérios e necessidades dos projetos de aterros sanitários e de inertes no sistema construtivo de valas

(conclusão)

<p><i>Monitoramento ambiental</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Qualidade das águas subterrâneas e superficiais: coleta de amostras para análise segundo limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº357 (2005) e, quando pertinente, pela Resolução CONAMA nº430 (2011);</i></li> <li>- <i>Qualidade do ar: medida dos níveis de partículas totais e inaláveis em suspensão e níveis de pressão sonora;</i></li> <li>- <i>Líquidos lixiviados (medida da vazão e análises físico-químicas);</i></li> <li>- <i>Gases: monitoramento qualitativo e quantitativo realizado no aterro - quantidade gerada e composição (SLU, 2011).</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Sistema de monitoramento das águas subterrâneas no aquífero mais próximo à superfície;</i></li> <li>- <i>As águas subterrâneas na área de influência do aterro devem atender aos padrões de potabilidade estabelecidos na legislação (NBR 13895: 1997);</i></li> <li>- <i>O sistema deve ser constituído de no mínimo quatro poços de monitoramento, sendo um a montante e três a jusante;</i></li> <li>- <i>Plano de inspeção e monitoramento das emissões de poluentes atmosféricos, vibrações e ruídos (CETESB, 2014).</i></li> </ul>
---------------------------------------	---	--

Fonte: Compilado da literatura.

#### 4.2.8 Licenciamento Ambiental

O início da construção e operação dos aterros apenas ocorre depois que os documentos são enviados ao cliente, aprovado por eles e também pelo órgão responsável pela fiscalização técnica. O cliente é responsável também pela obtenção das licenças necessárias para cada uma das etapas, sendo de suma importância a comunicação com os órgãos ambientais relacionados.

Um aspecto importante na elaboração de projetos de aterro é a estimativa de preços, que é apresentada como um dos itens das normas brasileiras e, como é destacado no relatório final da Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas (FIPE, 2017), diversos parâmetros devem ser considerados no cálculo dos custos de aterros, nas fases de implantação, manutenção, operação e encerramento das atividades, apresentados de forma resumida no Quadro 8.

Quadro 8 – Principais parâmetros considerados na estimativa de custos de aterros  
(continua)

<i>Etapa</i>	<i>Parâmetro</i>	<i>Descrição</i>
<i>Pré-implantação</i>	Estudos iniciais	Levantamento planialtimétrico; sondagens; implantação de poços de monitoramento de águas subterrâneas; estudo de viabilidade da área; análise da qualidade das águas superficiais
	Terreno	Aquisição do terreno; registro; custo de compra/ desapropriações
	Licenciamento	EIA/RIMA; obtenção de Licença Prévia, Licença de Instalação e Licença de Operação
	Projeto executivo	Engenharia executiva
<i>Implantação</i>	Canteiro de obras	Implantação, manutenção e retirada de canteiro de obras
	Construção gerais	Cercas; guaritas; sistema de abastecimento de água potável; sistema de coleta e tratamento de esgoto; iluminação das vias internas; galpão para equipamentos; almoxarifado; entre outros.
	Terraplenagem	Corte, carga, transporte e espalhamento de terra vegetal em bota fora; compra de solo
	Impermeabilização de fundo	Compra de argila de jazida externa; compactação; aplicação de geocomposto bentonítico na base; espalhamento de solo de confinamento; aplicação de manta PEAD; geotêxtil de proteção; espalhamento de solo fino sobre geotêxtil
	Drenagem de percolado e gás na base	Camada integral de rachão na base; dreno com tubo PEAD; poços de coleta e bombeamento de percolado; bomba para percolado
	Impermeabilização dos taludes	Aplicação de geocomposto bentonítico nos taludes de escavação do aterro; aplicação de geomembrana PEAD; geotêxtil de proteção; trincheira para ancoragem de geomembrana/ geocomposto
	Instalações para tratamento de percolado	Construção de lagoas de acumulação de percolado; posto de carregamento/recalque do percolado
	Drenagem de águas externas ao aterro	Canaletas; dissipadores de energia e lagoas de acumulação de águas pluviais
	Rede de captação ativa de biogás e sistema de queima	Equipamentos, tubulação e instalação

Quadro 9 – Principais parâmetros considerados na estimativa de custos de aterros  
(conclusão)

<i>Etapa</i>	<i>Parâmetro</i>	<i>Descrição</i>
<i>Operação</i>	<i>Equipamentos</i>	<i>Rolo compactador; trator esteira; escavadeira hidráulica; pá carregadeira; retro escavadeira; caminhão basculante para transporte de solo e para serviços diversos; caminhão pipa; caminhão munck; motoniveladora; entre outros.</i>
	<i>Mão de obra direta e indireta</i>	<i>Engenheiros; encarregado geral; servente; auxiliar; operador; pedreiro; fiscal; mecânico; eletricitista; armador/soldador, segurança do trabalho; motoristas, entre outros</i>
	<i>Drenagem de percolado e gás</i>	<i>Dreno horizontal de percolado, dreno vertical de drenagem de percolado/gás entre outros</i>
	<i>Cobertura operacional dos resíduos</i>	<i>Manta de sacrifício</i>
	<i>Drenagem de águas pluviais sobre o aterro</i>	<i>Drenagem de patamares; tubo de concreto; canaleta de gabião manta para descida da água nos taludes; caixas de dissipação no pé de cada gabião manta</i>
	<i>Tratamento de percolado</i>	<i>Custo operação por m<sup>3</sup> interno; transporte de efluente tratado para descarte</i>
	<i>Instrumentação</i>	<i>Piezômetros; marcos superficiais</i>
	<i>Manutenção das obras/ fornecimentos diversos</i>	<i>Manutenção de vias externas, gerais internas, das canaletas de drenagem superficial, dos prédios e galpões e das cercas</i>
	<i>Faturas</i>	<i>Consumo de energia, água, telefone entre outros</i>
	<i>Monitoramento</i>	<i>Análise das águas subterrâneas e superficiais, percolado, qualidade do ar e emanações gasosas e monitoramento geotécnico</i>
	<i>Outras despesas administrativas</i>	<i>Vigilância, entre outros</i>
<i>Fechamento</i>	<i>Cobertura parcial/ definitiva</i>	<i>Geotêxtil de proteção; geomembrana; camada drenante; solo de cobertura; solo orgânico; grama</i>
	<i>Custos administrativos</i>	<i>Relatórios; levantamento topográfico e vigilância</i>
	<i>Manutenção da área</i>	<i>Manutenção geral</i>
	<i>Monitoramento ambiental</i>	<i>Análise das águas subterrâneas e superficiais, percolado, qualidade do ar e emanações gasosas e monitoramento geotécnico</i>
	<i>Tratamento de percolado</i>	<i>Custo operação por m<sup>3</sup> interno; transporte de efluente tratado para descarte</i>

Fonte: Adaptação do relatório de Pesquisa da FIPE (2017).

É preciso ressaltar que grande parte dos parâmetros apresentados para a quantificação dos custos dos aterros sanitários são comuns para os aterros de inertes. No entanto, estes aterros se diferenciam, principalmente, quanto à ausência de sistema de drenagem de gases e de chorume, visto que os resíduos da construção civil e demolição são inertes, sendo necessária somente a previsão de um sistema de drenagem de águas pluviais. Outro ponto a se destacar no caso dos aterros em vala é o custo associado às obras de terraplenagem para a abertura das células do aterro, o que pode ser extremamente oneroso devido à necessidade do uso de maquinário pesado (rolos compactadores, tratores, escavadeiras, entre outros), além do transporte e descarte de solo de abertura em local apropriado.

Cabe ainda destacar a relação da aplicação de geossintéticos em diferentes funções e o valor agregado, que atualmente corresponde à uma porcentagem significativa dos gastos quanto à implantação e operação dos aterros. Alguns autores apresentam análise de viabilidade econômica para o sistema de tratamento dos resíduos, é considerando os fatores descritos anteriormente. Dessa forma, é possível estabelecer os custos diretos por m<sup>2</sup> e o custo total do aterro (MARTINS & ROCHA, 2010).



## 5 CONCLUSÕES

- A técnica de aterramento aliada às práticas de reutilização, reciclagem e compostagem da fração orgânica dos resíduos, são indicadas pela Lei 12.305/2010, para a gestão dos resíduos sólidos urbanos.

- Para o projeto de aterros é preciso selecionar a área adequada a sua implantação, o método construtivo, a necessidade de sistemas de captação e tratamento de chorume e gases, o uso de geossintéticos e o monitoramento ambiental e geotécnico nas fases de implantação, operação e fechamento do aterro, visando o atendimento das normas e legislação brasileira vigente.

- Para a seleção do método construtivo, além de considerar as características do meio físico é imprescindível analisar o volume de material a ser aterrado e o tempo de vida útil do aterro, bem como, a disponibilidade de equipamentos e de recursos municipais.

- Em municípios de pequeno porte, com população de até 20.000 habitantes e geração diária de resíduos inferior a 10 toneladas, os aterros sanitários em valas são viáveis, principalmente, quando implantados por consórcios intermunicipais, que reduzem os custos operacionais.

- O método construtivo de valas foi o mais indicado para os aterros sanitário e de inertes do município de pequeno porte utilizado neste estudo, devido às condições de relevo, de solo e volume de resíduos produzidos diariamente.

- O uso de geossintéticos em aterros apresenta uma série de vantagens, destacando-se a facilidade de aplicação e a grande versatilidade de uso como materiais drenantes, impermeabilizantes, de separação, filtração, contenção, proteção e outras, desde que sejam aplicados adequadamente e respeitando suas respectivas funções.

- O geossintético mais aplicado na impermeabilização do leito de células de aterros sanitários é a geomembrana de PEAD e no fechamento das células, destaca-se a geomanta por sua elevada durabilidade, alta resistência e estabilidade anti-raios UV.

- O aterro de inertes se diferencia do aterro sanitário, por não necessitar de sistema de drenagem de gases e de chorume, uma vez que os resíduos da construção civil e demolição são inertes, necessitando somente da implantação de um sistema de drenagem de águas pluviais.

## REFERÊNCIAS

ACURIO, G. *et al.* Diagnóstico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y el Caribe. **Série Ambiental**, Lima, v. 2, n. 18, p.130, 1998. Disponível em: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Diagn%C3%B3stico-de-la-situaci%C3%B3n-del-manejo-de-residuos-s%C3%B3lidos-municipales-en-Am%C3%A9rica-Latina-y-el-Caribe.pdf>. Acesso em 07 set. 2020.

ALBERTE, E. P. V. *et al.* Recuperação de áreas degradadas por disposição de resíduos sólidos urbanos. **Diálogos & Ciências: Revista eletrônica da Faculdade de Tecnologia e Ciências de Feira de Santana, Bahia**, v. 3, n. 5, p. 15, 2005. Disponível em: [https://limpezapublica.com.br/textos/20-06-2005\\_11-50-14\\_linkan.pdf](https://limpezapublica.com.br/textos/20-06-2005_11-50-14_linkan.pdf). Acesso em: 15 jul. 2020.

ALMEIDA, R. de A.; AMARAL, S. P. Lixo urbano, um velho problema atual. *In:* SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 13., 2006, Bauru. **Anais [...]**. Bauru: Universidade Federal Fluminense - UFF., 2006. p.7.

ALVES, D. de C.; TEIXEIRA, R. M. Estudo comparativo das técnicas de tratamento de chorume utilizadas em alguns aterros sanitários. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 2004, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: Núcleo de Informações em Saúde Ambiental da USP - NISAM., 2004. p. 4806 - 4815.

ANDRADE, S. F. **Aplicação da técnica de recirculação de chorume em aterros tropicais:** estudo de caso do aterro sanitário metropolitano centro (ASMC). 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014. Disponível em: <http://www.ppec.ufba.br/site/publicacoes/aplicacao-da-tecnica-de-recirculacao-de-chorume-em-aterros-tropicais-estudo-de-caso-do-a>. Acesso em: 23 maio 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2017. p. 74. Disponível em: [https://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama\\_abrelpe\\_2017.pdf](https://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf). Acesso em: 19 set. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8419:** apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, ABNT, 1992. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13896:** aterros de resíduos não perigosos: critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10157:** aterros de resíduos perigosos : critérios para projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1987. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16199**: geomembranas termoplásticas: instalação em obras geotécnicas e de saneamento ambiental. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 30p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 10318**: geossintéticos parte 1: termos e definições. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 77p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15113**: resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes: aterros: diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 16p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15352**: mantas termoplásticas de polietileno de alta densidade (PEAD) e de polietileno linear (PEBDL) para impermeabilização. Rio de Janeiro: ABNT, 2006. 17p.

BAPTISTA, V. F. As políticas públicas de coleta seletiva no município do Rio de Janeiro: onde e como estão as cooperativas de catadores de materiais recicláveis? **Revista de Administração Pública**, Rio de Janeiro, v. 49, n.1, p. 24, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rap/v49n1/0034-7612-rap-49-01-00141.pdf>. Acesso em: 15 out. 2020.

BARBOSA, T. S. P. A logística reversa como instrumento de vantagem competitiva. **Revista Terceiro Setor & Gestão-UNG-Ser**, Guarulhos, v. 11, n. 1, p. 05-23, 2018. Disponível em: <http://revistas.ung.br/index.php/3setor/article/view/2098>. Acesso em: 28 fev. 2020.

BARROS, C. A. P. *et al.* A contribuição da logística reversa para redução dos custos e do impacto ambiental. **Revista Ciências Gerenciais em Foco**, São Paulo, v. 4, n. 1, p. 1-17, 2018. Disponível em: <https://revista.uemg.br/index.php/cgf/article/view/2816>. Acesso em: 16 set. 2020.

BRASÍLIA. Resolução CONAMA nº 357 de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. **Diário Oficial da União**, Brasília, n. 357, p. 27, 2005. Disponível em:

BRASÍLIA. Resolução CONAMA nº 430 de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357. **Diário Oficial da União**, Brasília, n. 430, p.9, 2011.

CARDIM, R. D. **Estudo da resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2008. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/41036820\\_Estudo\\_da\\_resistencia\\_de\\_residuos\\_solidos\\_urbanos\\_por\\_meio\\_de\\_ensaios\\_de\\_cisalhamento\\_direto\\_de\\_grandes\\_dimensoes](https://www.researchgate.net/publication/41036820_Estudo_da_resistencia_de_residuos_solidos_urbanos_por_meio_de_ensaios_de_cisalhamento_direto_de_grandes_dimensoes). Acesso em: 21 abr. 2020.

CEMPRE COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **Lixo municipal:** manual de gerenciamento integrado. Disponível em: <https://cempre.org.br>. Acesso em: 13 mar. 2020.

CHRISTENSEN, T. H. *et al.* Biochemistry of landfill leachate plumes. **Journal of Applied Geochemistry**, Vancouver, v. 16, p. 659-718, 2001. Disponível em: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/biogeochemistry-of-landfill-leachate-plumes>. Acesso em: 12 maio 2020.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO URBANO DO ESTADO DA BAHIA. **Manual de operação de aterros sanitários:** resíduos sólidos e sua destinação final. Disponível em: <http://www.conder.ba.gov.br>. Acesso em: 19 set. 2020.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Biogás:** aterro sanitário. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/aterro-sanitario/>. Acesso em: 15 jul. 2020.

COSTA, T. G. A. *et al.* Impactos ambientais de lixão a céu aberto no Município de Cristalândia, Estado do Piauí, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, Piauí, v. 3, n. 4, p. 79-86, 2016. Disponível em: <http://revista.ecogestaobrasil.net/v3n4/v03n04a08.pdf>. Acesso em: 30 dez. 2020.

DUARTE, A. S. **Aplicação de geossintéticos na impermeabilização e selagem de aterros.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Faculdade de Engenharia do Ambiente, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

FAGUNDES, G. de S. **Influência do antigo lixão do Roger, João Pessoa, nas águas subterrâneas locais.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/5447/1/arquivototal.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2020.

FIEIRA, C. **Avaliação da eficiência das lagoas de tratamento do aterro municipal de Francisco Beltrão.** 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2014. Disponível em [http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/11479/2/FB\\_COEAM\\_2013\\_2\\_07.pdf](http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/11479/2/FB_COEAM_2013_2_07.pdf). Acesso em: 12 jan. 2020.

FONSECA, M. M. da. **Avaliação do gerenciamento de um aterro de resíduos industriais perigosos a partir da aplicação de um índice de qualidade.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2018.

GARSON, S. Regiões metropolitanas: diversidade e dificuldade fiscal da cooperação. **Cadernos Metrôpoles**, São Paulo, v. 11, n. 22, p. 435-451, 2009. Disponível em: <https://revistas.pucsp.br/index.php/metropole/article/view/5942/0>. Acesso em: 21 mar. 2020.

GEOFOCO. **Biomanta**. Disponível em: <http://geofoco.com.br/geossinteticos/biomanta/>. Acesso em: 11 ago. 2020.

GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Revista Ciência e Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v.17, n.6, p.1503-1510, 2012.

GUARNIERI, P. *et al.* A caracterização da logística reversa no ambiente empresarial em suas áreas de atuação: pós-venda e pós-consumo agregando valor econômico e legal. **Revista Tecnologia & Humanismo**, Paraná, v. 19, n. 1, p. 120-131, 2005. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rth/article/view/6372>. Acesso em: 16 jul. 2020.

HEBER, F.; SILVA, ELVIS M. D. Institucionalização da Política Nacional de Resíduos Sólidos: dilemas e constrangimentos na Região Metropolitana de Aracaju (SE). **Revista de Administração Pública**, Rio de Janeiro, v. 48, n. 4, p. 913-937, 2014.

INOVAGEO. **Geocélula**. Disponível em: <https://inovageo.eng.br/project/geocelula/>. Acesso em: 11 ago. 2020.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA E NÚCLEO DE PESQUISAS EM INFORMAÇÕES URBANAS. **Gestão do uso do solo e disfunções do crescimento urbano**. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br>. Acesso em: 12 out. 2020.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos**. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal>. Acesso em: 15 maio 2020.

KOERNER, R. M. **Designing with geosynthetics**. 5. ed. New Jersey: Pearson Education, 2005. 380 p. Disponível em: <https://dokumen.tips/engineering/designing-with-geosynthetics-by-koerner-5th-edition-2005.html>. Acesso em: 26 out. 2020.

LAVNITCKI, L.; BAUM, C. A.; BECEGATO, V. A. Política nacional dos resíduos sólidos: abordagem da problemática no Brasil e a situação na região Sul. **Revista de Educação Ambiental**, Santa Catarina v. 23, n. 3, p. 379-401, 2018. Disponível em: <https://periodicos.furg.br/ambeduc/article/view/7783>. Acesso em: 14 fev. 2020.

LEITE, P. R. **Logística reversa: meio ambiente e competitividade**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2009. 256 p.

LOUREIRO, S. M. **Índice de qualidade no sistema da gestão ambiental em aterros de resíduos sólidos urbanos IQS**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://www.coc.ufRJ.br/pt/documents2/mestrado/2005-1/1676-saulo-machado-loureiro-mestrado/file>. Acesso em: 12 jun. 2020.

MAIA, N. P. **O uso de materiais geossintéticos em aterros sanitários**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

MARTINS, E.; ROCHA, W. **Métodos de custeio comparados: custos e margens analisados sob diferentes perspectivas**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2015. 192 p.

MEDEIROS, A. P. de. **Análise da aplicação de geossintéticos no aterro sanitário de Seropédica/RJ**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/15638/1/APM15052019.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2020.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **New York: aproveitamento energético do biogás de aterro sanitário**. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario.html>. Acesso em: 10 ago. 2020.

MONTEIRO, A. E. **Índice de qualidade de aterros industriais IQRI**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

MORAES, J. L. D. Os consórcios públicos e a gestão integrada de resíduos sólidos em pequenos municípios do estado do Ceará. **Revista Geonorte**, Ceará, v. 3, n. 4, p. 1171-1180, 2012. Disponível em: <https://www.periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/2014>. Acesso em: 17 out. 2020.

OBLADEN, N. L.; OBLADEN, N.T.R.; BARROS, K.R. **Guia para elaboração de projetos de aterros sanitários para resíduos sólidos urbanos**. Paraná: Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia do Paraná, 2007. v.3. 63 p. Disponível em: <https://www.crea-pr.org.br/ws/wp-content/uploads/2016/12/Publica%C3%A7%C3%B5es-Tem%C3%A1ticas-Guia-para-Elabora%C3%A7%C3%A3o-de-Projetos-de-Aterros-Sanit%C3%A1rios-para-Res%C3%ADuos-S%C3%B3lidos-Urbanos-Volume-II.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2020.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando nosso mundo: a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**. Traduzido pelo Centro de Informação das Nações Unidas para o Brasil (UNIC Rio), última edição em 13 de outubro de 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2015/10/agenda2030-pt-br.pdf>. Acesso em: 10 ago 2020.

OTTONI, M. S. O., NASCIMENTO H. F. do, XAVIER L. H. Geração de resíduos eletroeletrônicos no Estado do Rio de Janeiro: logística reversa a partir dos pontos de entrega voluntária (PEVS). *In*: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE, 1., 2018. Gramado. **Anais [...]**. Gramado: Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais - IBEAS, 2018, 6p.

PIMENTEIRA, C. A. P. **Gestão integrada de resíduos sólidos no Rio de Janeiro: impactos das decisões dos gestores nas políticas públicas**. 2011. Dissertação (Doutorado em Engenharia) - Coppe/Programa de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: [http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/doutorado/Cicero\\_Augusto\\_Prudencio\\_Pimenteira.pdf](http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/doutorado/Cicero_Augusto_Prudencio_Pimenteira.pdf). Acesso em: 19 nov. 2020.

PINTO, T. P.; GONZÁLES, J. L. R. **Manejo e gestão de resíduos da construção civil: como implantar um sistema de manejo e gestão dos resíduos da construção civil nos municípios.** Brasília, 2005. v.1, 98p. Disponível em: [https://www.cuiaba.mt.gov.br/upload/arquivo/Manual\\_RCD\\_Vol1.pdf](https://www.cuiaba.mt.gov.br/upload/arquivo/Manual_RCD_Vol1.pdf). Acesso em: 21 abr. 2020.

ROCHA, E. M. R. **Desempenho de um sistema de lagoas de estabilização na redução da carga orgânica do percolado gerado no aterro da Muribeca – PE.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5721>. Acesso em: 14 maio. 2020.

SANTOS, G. G. D. dos. **Análise e perspectivas de alternativas de destinação dos resíduos sólidos urbanos: o caso da incineração e da disposição em aterro.** 2011. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Coppe/Programa de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: [http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe\\_m/GuilhermeGarciaDiasDosSantos.pdf](http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/GuilhermeGarciaDiasDosSantos.pdf). Acesso em: 16 jan. 2020.

SAVASTANO NETO, A. *et al.* **Manual de operação de aterro sanitário em valas.** 2. ed. São Paulo: CETESB, 2010. 24 p.

SIMÕES, G.F.; CATAPRETA, C.A.A.; MARTINS, H.L. Monitoramento geotécnico de aterros sanitários. *In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS E TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS*, 2006, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: COOPE-UFRJ, 2006. Trabalhos realizados na central de tratamento de resíduos sólidos da BR-040 em Belo Horizonte/ MG.

SIZIRICI, B.; TANSEL, B. Parametric fate and transport profiling for selective groundwater monitoring at closed landfills: a case study. **Waste Management**, v.38, n.1, p.263-270, 2014.

SINDUSCON CE. **Manual sobre os resíduos sólidos da construção civil.** Disponível em: <https://sindusconsp.com.br>. Acesso em: 12 out. 2020.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. **Gestión integral de residuos sólidos.** São Paulo: McGraw-Hill, 1994. v.1, 607 p. Disponível em: <https://www.worldcat.org/title/gestion-integral-de-residuos-solidos-volumen-i/oclc/932758261>. Acesso em: 13 maio 2020.

TORRES, P. *et al.* Tratabilidade biológica de chorume produzido em aterro não controlado. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, São Carlos, v.2, n.2, p.55, abr/jun, 1997.

TRESSOLDI, M.; CONSONI, A.J. Disposição de resíduos. *In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (ed.). Geologia de engenharia.* São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. cap. 21, p. 343-360.

VIDAL, D. de M.; MATTOS, D.; FABRIN, T. W. O dimensionamento de geossintéticos em problemas de subsidência. *In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE GEOSSINTÉTICOS*

NA GEOTECNIA AMBIENTAL, 2001, São José dos Campos. **Anais** [...]. São José dos Campos: Associação Brasileira de Geossintéticos– IGS Brasil, 2001, p. 113-124.

ZANTA, V. M.; FERREIRA, C. F. Gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos. *In*: CASTILHOS, A. B. J. **Resíduos sólidos urbanos**: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. Florianópolis: PROSAB 3, 2003. cap 1, p. 20-22. Disponível em:<http://limpezapublica.com.br/textos/livroprosab.pdf>. Acesso em: 07 abr. 2020.



## APÊNDICE A – Dimensionamento aterro sanitário de pequeno porte

A seguir são apresentados os resultados dos cálculos de dimensionamento do aterro sanitário, utilizando o modelo construtivo de valas, por se tratar de um município de pequeno porte e com disponibilidade de área plana, com Latossolos, que devido à elevada profundidade, reduz os riscos de contaminação do nível freático.

### *Primeiro Ano de Operação:*

Massa de rejeitos ( $t \text{ dia}^{-1}$ ) = população atual x geração per capita x cobertura de coleta municipal

$$\begin{aligned} &= 20.000 \text{ hab.} \times 1,00 \text{ kg hab.}^{-1} \text{ dia}^{-1} \times 0,8 \\ &= 16.000 \text{ kg dia}^{-1} / 1000 \text{ kg} = 16 \text{ t dia}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume de rejeitos (m}^3\text{dia}^{-1}\text{)} &= \text{Massa de rejeitos (t dia}^{-1}\text{)} / \text{peso específico (t m}^{-3}\text{)} \\ &= 16 \text{ t dia}^{-1} / 0,6 \text{ t m}^{-3} = 26,67 \text{ m}^3\text{dia}^{-1} \\ &= 26,67 \text{ m}^3\text{dia}^{-1} \times 365 \text{ dias} = 9.733,33 \text{ m}^3\text{ano}^{-1} \end{aligned}$$

*Segundo Ano de Operação:* Foi considerada a taxa de crescimento populacional de 0, 8% a.a.

$$\begin{aligned} \text{População}_{2\text{ano}} &= \text{população atual} \times (1 + 0,0080)^2 \\ \text{Pop.}_{2\text{ano}} &= 20.000 \text{ hab.} \times (1 + 0,0080)^2 = 20.321 \text{ hab.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa de rejeitos (t dia}^{-1}\text{)} &= \text{Pop.}_{2\text{ano}} \times \text{geração per capita} \times \text{cobertura de coleta municipal} \\ &= 20.321 \text{ hab.} \times 1,0 \text{ kg hab.}^{-1} \text{ dia}^{-1} \times 0,8 \\ &= 16.256,8 \text{ kg dia}^{-1} / 1000 \text{ kg} = 16,26 \text{ t dia}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume de rejeitos (m}^3\text{dia}^{-1}\text{)} &= \text{Massa de rejeitos (t dia}^{-1}\text{)} / \text{peso específico (t m}^{-3}\text{)} \\ &= 16,26 \text{ t dia}^{-1} / 0,6 \text{ t m}^{-3} = 27,10 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1} \\ &= 27,10 \text{ m}^3\text{dia}^{-1} \times 365 \text{ dias} = 9.889,55 \text{ m}^3\text{ano}^{-1} \end{aligned}$$

*Quinto Ano de Operação:* Foi considerada a taxa de crescimento populacional de 0, 80% a.a.

$$\begin{aligned} \text{População}_{5\text{ano}} &= \text{população atual} \times (1 + 0,0080)^5 \\ \text{Pop.}_{5\text{ano}} &= 20.000 \text{ hab.} \times (1 + 0,0080)^5 = 20.813 \text{ hab.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa de rejeitos (t dia}^{-1}\text{)} &= 20.813 \text{ hab.} \times 1,0 \text{ kg hab.}^{-1} \text{ dia}^{-1} \times 0,8 \\ &= 16.650 \text{ kg dia}^{-1} / 1000 \text{ kg} = 16,65 \text{ t dia}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume de rejeitos (m}^3\text{dia}^{-1}\text{)} &= 16,65 \text{ t dia}^{-1} / 0,6 \text{ t m}^{-3} = 27,75 \text{ m}^3\text{dia}^{-1} \\ &= 27,75 \text{ m}^3\text{dia}^{-1} \times 365 \text{ dias} = 10.128,99 \text{ m}^3\text{ano}^{-1} \end{aligned}$$

*Décimo Ano de Operação:* considerando a taxa de crescimento populacional de 0, 80% a.a.

$$\begin{aligned} \text{População}_{10\text{ano}} &= \text{população atual} \times (1 + 0,0080)^{10} \\ \text{Pop.}_{10\text{ano}} &= 20.000 \text{ hab.} \times (1 + 0,0080)^{10} = 21.659 \text{ hab.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Massa de rejeitos (t dia}^{-1}\text{)} &= 21.659 \text{ hab.} \times 1,0 \text{ kg hab.}^{-1} \text{ dia}^{-1} \times 0,8 \\ &= 17327,08 \text{ kg dia}^{-1}/1000 \text{ kg} = 17,33 \text{ t dia}^{-1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Volume de rejeitos (m}^3\text{dia}^{-1}\text{)} &= 17,33 \text{ t dia}^{-1}/0,6 \text{ t m}^{-3} = 28,88 \text{ m}^3\text{dia}^{-1} \\ &= 28,88 \text{ m}^3\text{dia}^{-1} \times 365 \text{ dias} = 10.541,71 \text{ m}^3\text{ano}^{-1}\end{aligned}$$

**Vigésimo Quinto Ano de Operação:** considerando a taxa de crescimento populacional de 0,80% a.a.

$$\begin{aligned}\text{População}_{25\text{ano}} &= \text{população atual} \times (1 + 0,0080)^{25} \\ \text{Pop.}_{25 \text{ ano}} &= 20.000 \text{ hab.} \times (1 + 0,0080)^{25} = 24.409 \text{ hab.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Massa de rejeitos (t dia}^{-1}\text{)} &= 24.409 \text{ hab.} \times 1,0 \text{ kg hab.}^{-1}\text{dia}^{-1} \times 0,8 \\ &= 19526,90 \text{ kg dia}^{-1}/1000 \text{ kg} = 19,53 \text{ t dia}^{-1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Volume de rejeitos (m}^3\text{dia}^{-1}\text{)} &= 18,53 \text{ t dia}^{-1}/0,6 \text{ t m}^3 = 32,55 \text{ m}^3\text{dia}^{-1} \\ &= 32,55 \text{ m}^3\text{dia}^{-1} \times 365 \text{ dias} = 11.879,05 \text{ m}^3\text{ano}^{-1}\end{aligned}$$

Para o cálculo da área a ser aterrada mensalmente no primeiro ano de operação do aterro sanitário, foi considerada a altura de 5m de vala e o volume de resíduos gerados por mês (30 dias), como apresentado a seguir:

Volume de rejeitos no primeiro ano (m<sup>3</sup>dia<sup>-1</sup>): 26,67 m<sup>3</sup>dia<sup>-1</sup> (após compactação)

Adotou-se: 28 m<sup>3</sup>dia<sup>-1</sup> (com margem de segurança)

Volume mensal = 28 m<sup>3</sup>dia<sup>-1</sup> x 30 dias = 840 m<sup>3</sup> de rejeitos no primeiro mês de operação do aterro

Volume anual = 28 m<sup>3</sup>dia<sup>-1</sup> x 365 dias = 10.220,22 m<sup>3</sup>ano<sup>-1</sup>

***Cálculo da área da vala a ser aterrada mensalmente no primeiro ano de operação***

Adotando-se a altura de 5m e a fórmula Volume = Área x Altura:

Volume mensal = Área x altura

$$840 \text{ m}^3 = \text{Área} \times 5 \text{ m}$$

$$\text{Área} = 168 \text{ m}^2$$

***Dimensionamento da vala:***

Área (A) = Comprimento (C) x Largura (L)

Adotando-se a relação: C = 3 x L

Área = C x L, substituindo C: Área = 3L<sup>2</sup>

$$168 \text{ m}^2 = 3L^2$$

$$L^2 = 56 \text{ m}^2$$

L = 7,48 m, substituindo L:

$$C = 3 \times 7,48 \text{ m}$$

$$C = 22,45 \text{ m}$$

Assim, no primeiro ano, para o aterramento mensal de 840 m<sup>3</sup> de rejeitos municipais, as valas deverão ter a dimensão de 168m<sup>2</sup> sendo: 7,48m de largura x 22,45m de comprimento x 5m de altura. Para o cálculo do volume de solo necessário para a cobertura das camadas de rejeitos compactados, considerou-se que 80% da vala são ocupados com rejeitos e 20% com solo, como geralmente ocorre em projetos similares, sendo utilizado o solo retirado na escavação da área para a abertura das valas, por se tratar de um Latossolo, com propriedades indicadas para este fim.

Da mesma forma, para o cálculo da área da vala a ser aterrada mensalmente do segundo ao vigésimo quinto ano de operação do aterro sanitário, foi considerada a altura de 5m e o dimensionamento foi realizado aplicando as fórmulas:

Volume de rejeitos gerados no 25º ano do aterro (m<sup>3</sup>dia<sup>-1</sup>): 32,54 m<sup>3</sup>dia<sup>-1</sup>

Adotou-se: 35 m<sup>3</sup>dia<sup>-1</sup> (como margem de segurança)

Abertura mensal de célula (30 dias)

Volume mensal = 35 m<sup>3</sup>dia<sup>-1</sup> x 30 dias = 1050 m<sup>3</sup>

Volume anual = 35 m<sup>3</sup>dia<sup>-1</sup> x 365 dias = 12.775,00 m<sup>3</sup>

***Área da vala a ser aterrada mensalmente no último ano de operação (25º ano):***

Adotando-se a altura de 5m e a fórmula Volume = Área x Altura:

Volume mensal = Área x Altura

1.050m<sup>3</sup> = Área x 5 m

Área = 210 m<sup>2</sup>

***Dimensionamento da vala no último ano de operação (25º ano):***

Área (A) = Comprimento (C) x Largura (L)

Adotando-se a relação: C = 3 x L

Área = C x L, substituindo C: Área = 3L<sup>2</sup>

210m<sup>2</sup> = 3L<sup>2</sup>

L<sup>2</sup> = 70m<sup>2</sup>

L = 8,37 m, substituindo L:

C = 3 x 8,37 m

C = 25,105 m

Portanto, no vigésimo quinto ano de vida útil, para o aterramento mensal de 1.050 m<sup>3</sup> de rejeitos municipais, as valas devem ter a dimensão de 210m<sup>2</sup> sendo: 8,37m de largura x 25,105m de comprimento x 5m de altura.

## APÊNDICE B – Dimensionamento aterro sanitário de pequeno porte

O aterro de inertes permite a disposição de resíduos sólidos da construção civil de classe A e inertes, sendo estes confinados no menor volume possível a fim de permanecerem reservados até que seja atribuído um uso futuro (reciclagem ou reutilização). Para o dimensionamento do aterro de inertes foram considerados: população atual: 20.000 habitantes, taxa de crescimento populacional: 0,8% ao ano; cobertura pelo serviço de coleta municipal: 80%; geração *per capita* de rejeitos: 0,8 kg hab.<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>; peso específico dos rejeitos compactados no aterro: 1,28 t m<sup>-3</sup> e tempo de vida útil: indeterminado (reserva temporária de 2 anos).

1. Cálculo do volume útil total de um aterro sanitário no primeiro, no segundo, no quinto, no décimo e no vigésimo quinto ano de operação.

### *Primeiro Ano de Operação:*

$$\begin{aligned} \text{Massa de rejeitos (t dia}^{-1}\text{)} &= \text{população atual} \times \text{geração per capita} \times \text{cobertura de coleta municipal} \\ &= 20.000 \text{ hab.} \times 0,8 \text{ kg hab.}^{-1} \text{ dia}^{-1} \times 0,8 \\ &= 12.800 \text{ kg dia}^{-1} / 1000 \text{ kg} = 12,80 \text{ t dia}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume de rejeitos (m}^3\text{dia}^{-1}\text{)} &= \text{Massa de rejeitos (t dia}^{-1}\text{)} / \text{peso específico (t m}^{-3}\text{)} \\ &= 12,80 \text{ t dia}^{-1} / 1,28 \text{ t m}^{-3} = 10 \text{ m}^3\text{dia}^{-1} \\ &= 10 \text{ m}^3\text{dia}^{-1} \times 365 \text{ dias} = 3.650 \text{ m}^3\text{ano}^{-1} \end{aligned}$$

*Segundo Ano de Operação:* Considera-se a taxa de crescimento populacional de 0, 80% a.a.

$$\begin{aligned} \text{População}_{2\text{ano}} &= \text{população atual} \times (1 + 0,0080)^2 \\ \text{Pop.}_{2\text{ano}} &= 20.000 \text{ hab.} \times (1 + 0,0080)^2 = 20.321 \text{ hab.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa de rejeitos (t dia}^{-1}\text{)} &= \text{Pop.}_{2\text{ano}} \times \text{geração per capita} \times \text{cobertura de coleta municipal} \\ &= 20.321 \text{ hab.} \times 0,8 \text{ kg hab.}^{-1} \text{ dia}^{-1} \times 0,8 \\ &= 13.005,44 \text{ kg dia}^{-1} / 1000 \text{ kg} = 13 \text{ t dia}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume de rejeitos (m}^3\text{dia}^{-1}\text{)} &= \text{Massa de rejeitos (t dia}^{-1}\text{)} / \text{peso específico (t m}^{-3}\text{)} \\ &= 13,00 \text{ t dia}^{-1} / 1,28 \text{ t m}^{-3} = 10,16 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1} \\ &= 10,16 \text{ m}^3\text{dia}^{-1} \times 365 \text{ dias} = 3.708 \text{ m}^3\text{ano}^{-1} \end{aligned}$$

*Quinto Ano de Operação:* Considera-se a taxa de crescimento populacional de 0, 80% a.a.

$$\begin{aligned} \text{População}_{5\text{ano}} &= \text{população atual} \times (1 + 0,0080)^5 \\ \text{Pop.}_{5\text{ano}} &= 20.000 \text{ hab.} \times (1 + 0,0080)^5 = 20.813 \text{ hab.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa de rejeitos (t dia}^{-1}\text{)} &= 20.813 \text{ hab.} \times 0,8 \text{ kg hab.}^{-1} \text{ dia}^{-1} \times 0,8 \\ &= 13.320 \text{ kg dia}^{-1} / 1000 \text{ kg} = 13,32 \text{ t dia}^{-1} \end{aligned}$$

$$\text{Volume de rejeitos (m}^3\text{dia}^{-1}\text{)} = 13,32 \text{ t dia}^{-1} / 1,28 \text{ t m}^{-3} = 10,41 \text{ m}^3\text{dia}^{-1}$$

$$= 10,41 \text{ m}^3\text{dia}^{-1} \times 365 \text{ dias} = 3.798,37 \text{ m}^3\text{ano}^{-1}$$

**Décimo Ano de Operação:** Considera-se a taxa de crescimento populacional de 0,80% a.a.

$$\begin{aligned} \text{População}_{10 \text{ ano}} &= \text{população atual} \times (1 + 0,0080)^{10} \\ \text{Pop.}_{10 \text{ ano}} &= 20.000 \text{ hab.} \times (1 + 0,0080)^{10} = 21.659 \text{ hab.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa de rejeitos (t dia}^{-1}\text{)} &= 21.659 \text{ hab.} \times 0,8 \text{ kg hab.}^{-1} \text{ dia}^{-1} \times 0,8 \\ &= 13.861,76 \text{ kg dia}^{-1} / 1000 \text{ kg} = 13,86 \text{ t dia}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume de rejeitos (m}^3\text{dia}^{-1}\text{)} &= 13,86 \text{ t dia}^{-1} / 1,28 \text{ t m}^{-3} = 10,83 \text{ m}^3\text{dia}^{-1} \\ &= 10,83 \text{ m}^3\text{dia}^{-1} \times 365 \text{ dias} = 3.952,77 \text{ m}^3\text{ano}^{-1} \end{aligned}$$

**Vigésimo Quinto Ano de Operação:** Considera-se a taxa de crescimento populacional de 0,80% a.a.

$$\begin{aligned} \text{População}_{20 \text{ ano}} &= \text{população atual} \times (1 + 0,0080)^{25} \\ \text{Pop.}_{20 \text{ ano}} &= 20.000 \text{ hab.} \times (1 + 0,0080)^{25} = 24.409 \text{ hab.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa de rejeitos (t dia}^{-1}\text{)} &= 24.409 \text{ hab.} \times 0,8 \text{ kg hab.}^{-1} \text{ dia}^{-1} \times 0,8 \\ &= 15.621,76 \text{ kg dia}^{-1} / 1000 \text{ kg} = 15,62 \text{ t dia}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume de rejeitos (m}^3\text{dia}^{-1}\text{)} &= 15,62 \text{ t dia}^{-1} / 1,28 \text{ t m}^{-3} = 12,20 \text{ m}^3\text{dia}^{-1} \\ &= 12,20 \text{ m}^3\text{dia}^{-1} \times 365 \text{ dias} = 4.454,64 \text{ m}^3\text{ano}^{-1} \end{aligned}$$

2. Cálculo da área a ser depositados mensalmente, com rejeitos gerados nos primeiros dois anos de operação do aterro de inertes, considerando a altura de 5m para a célula (vala) de deposição. Será uma base para os demais períodos, visto que a cada dois anos considera-se que os resíduos depositados serão reciclados e vendidos como agregados.

Área (A) = Comprimento (C) x Largura (L);  
adotando a relação:  $C = 3 \times L$ .

Primeiro Ano: abertura de células (valas) - Frente de Trabalho

$$\begin{aligned} \text{Volume de rejeitos primeiro ano (m}^3\text{dia}^{-1}\text{)} &: 10,16 \text{ m}^3\text{dia}^{-1} \\ \text{Adotou-se: } &12 \text{ m}^3\text{dia}^{-1} \text{ (margem de segurança)} \\ \text{Abertura mensal de célula (30 dias)} & \\ \text{Volume mensal} &= 12 \text{ m}^3\text{dia}^{-1} \times 30 \text{ dias} = 360 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

**Área da célula (vala) a ser aterrada mensalmente no primeiro ano de operação**

Adotando-se a altura de 5m e a fórmula Volume = Área x Altura:

$$\begin{aligned} \text{Volume mensal} &= \text{Área} \times \text{altura} \\ 360 \text{ m}^3 &= \text{Área} \times 5 \text{ m} \\ \text{Área} &= 72 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

**Dimensionamento da Célula (vala):**

$$\begin{aligned} \text{Área (A)} &= \text{Comprimento (C)} \times \text{Largura (L)} \\ \text{Adotando-se a relação: } &C = 3 \times L \\ \text{Área} &= C \times L, \text{ substituindo C: } \text{Área} = 3L^2 \\ 72 \text{ m}^2 &= 3L^2 \\ L^2 &= 24 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$L = 4,90$  m, substituindo L:

$C = 3 \times 4,90$  m

$C = 14,70$  m

Célula (vala) de  $72\text{m}^2$  a ser aterrada mensalmente no primeiro ano

Portanto, a cada dois anos, para o aterramento mensal de  $360\text{ m}^3$  de rejeitos inertes, as valas deverão ter a dimensão de  $72\text{m}^2$  sendo:  $4,9\text{m}$  de largura x  $14,70\text{m}$  de comprimento x  $5\text{m}$  de altura. Vale ressaltar que com o passar do tempo a população crescerá, aumentando o volume acumulado de rejeitos. Sendo assim haverá um pequeno aumento nas dimensões da trincheira. Vale ressaltar que a possibilidade de reutilizar a vala a cada vez que os resíduos forem retirados para reciclagem, evita retrabalho e diminui gastos operacionais, em especial, com reabertura de novas frentes de trabalho.

Considerando que o contingente de geração dos RCD de Classe A (cerâmicos, metais, derivados do concreto e solo de terraplenagem) dispostos neste aterro pode variar bastante, e o método construtivo, como apresentado, foi o de trincheiras, recomenda-se a divisão da área de aterramento em 4 valas, correspondendo cada uma, a um tipo de resíduo, de maneira que o volume total calculado também seja distribuído nestas 4 valas.

Dos cálculos apresentados, foram gerados os resultados de massa diária e anual de rejeitos, o volume diário e anual de rejeitos e bianual acumulado, ao longo de 25 anos de operação do aterro, somente a título de comparação com o aterro sanitário, tendo em vista que não se pode estabelecer a vida útil de um aterro de inertes, devido a sua função de depósito temporário de RCD, ao contrário do aterro sanitário, que tem a função de disposição final em caráter permanente.