

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTAÇÕES TÉCNICAS E DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS DE PROJETO
DE UM ATERRO SANITÁRIO: ESTUDO DE CASO APLICÁVEL AO MUNICÍPIO DE
JUIZ DE FORA - MG

MARIANA OLIVEIRA DE CASTRO

JUIZ DE FORA

2022

ORIENTAÇÕES TÉCNICAS E DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS DE PROJETO
DE UM ATERRO SANITÁRIO: ESTUDO DE CASO APLICÁVEL AO MUNICÍPIO DE
JUIZ DE FORA - MG

MARIANA OLIVEIRA DE CASTRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Juiz de Fora, como
requisito parcial à obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Civil.

Área de Conhecimento: Geotecnia Ambiental

Orientadora: Júlia Righi de Almeida

Juiz de Fora

Faculdade de Engenharia da UFJF

2022

ORIENTAÇÕES TÉCNICAS E DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS DE PROJETO
DE UM ATERRO SANITÁRIO: ESTUDO DE CASO APLICÁVEL AO MUNICÍPIO DE
JUIZ DE FORA - MG

MARIANA OLIVEIRA DE CASTRO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora constituída de acordo com a Resolução Nº 01/2018 do Colegiado do Curso de Engenharia Civil, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em:

Por:

Prof.(a) Júlia Righi de Almeida, D.Sc (Orientadora)

Universidade Federal de Juiz de Fora / Departamento de Transportes e Geotecnia

Prof.(a) Cátia de Paula Martins, D.Sc (Examinadora 01)

Universidade Federal de Juiz de Fora / Departamento de Transportes e Geotecnia

Prof. Heraldo Nunes Pitanga, D.Sc (Examinador 02)

Universidade Federal de Juiz de Fora / Departamento de Transportes e Geotecnia

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, por sempre guiar meus passos e me permitir chegar até aqui. Palavras nunca serão suficientes para agradecer tanta Graça e Amor que me foram concedidos.

Aos meus pais, Edison e Zélia, por todo apoio e por não medirem esforços para que eu alcançasse meus objetivos. Obrigada por sempre priorizarem meus estudos, apesar de todas as dificuldades encontradas. Vocês são minha maior inspiração e eu sou extremamente privilegiada por ter vocês como pais. Essa vitória é de vocês!

À minha irmã, Ana Letícia, por dividir a vida comigo. Obrigada por celebrar comigo cada vitória e me incentivar quando as coisas não saíam como esperado. Você é um dos maiores presentes que ganhei nessa vida.

Aos meus familiares, que sempre me apoiaram e torceram por mim. Vocês têm grande contribuição nesta conquista.

Aos amigos que a UFJF me deu, por tornarem a caminhada mais leve e divertida. Obrigada pela companhia nos dias bons e por sempre me proporcionarem boas risadas nos dias corridos e difíceis.

Ao Programa de Educação Tutorial (PET) por tantos ensinamentos e por me apresentar ótimos amigos. Obrigada por transformar a minha graduação e me permitir contribuir com a melhoria do curso de Engenharia Civil.

Ao Projeto de Monitoria da disciplina Elementos de Geologia, por me apresentarem o vasto mundo da Geologia e também da Geotecnia Ambiental. Sem dúvidas, esta experiência foi fundamental na escolha do tema deste trabalho.

À minha orientadora, Júlia Righi, por todo apoio e auxílio nestes anos de graduação e, principalmente, no desenvolvimento deste trabalho. Obrigada por toda disponibilidade e por me inspirar como profissional e como ser humano.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Juiz de Fora, por ser minha segunda casa durante esses anos e por me proporcionar um ensino público, gratuito e de muita qualidade. Muito obrigada!

“Nunca ande por trilhas, pois assim só irá até onde outros já foram.”

(Alexander Graham Bell)

RESUMO

Apesar dos avanços ocorridos nos últimos anos, o cenário brasileiro de disposição final de resíduos ainda aponta um atraso em relação aos países desenvolvidos, com 40% dos resíduos gerados sendo dispostos em aterros controlados e lixões. O aterro sanitário, única forma de disposição final ambientalmente adequada, é considerado uma estrutura recente no país e, neste contexto, depara-se com obstáculos como a carência de referências no que diz respeito à projetos e operação desta obra de Engenharia. Perante o exposto, o presente trabalho tem como objetivo compilar os conceitos fundamentais acerca da temática dos resíduos sólidos e aterros sanitários e, a partir disso, propor um estudo de caso no qual será realizado o dimensionamento de um aterro para o município de Juiz de Fora - MG. Para isso, foi feita uma revisão bibliográfica selecionando as principais informações e principais métodos utilizados para dimensionamento das etapas do aterro, bem como uma análise das normas e legislações vigentes. Ao fim do estudo, através de análises de características geológicas, geotécnicas e climatológicas foi possível propor uma geometria final para o aterro e um sistema de impermeabilização de sua base. Logo após, foi proposto um sistema para drenagem das águas pluviais através de canaletas de concreto de dimensões 80 x 80 cm. Através do Método Suíço foi possível dimensionar o sistema de drenagem de chorume, que será feito com drenos de diâmetros de 30 e 40 cm. O gás será drenado através de tubos perfurados de concreto que serão envoltos por pedras tipo rachão. Por fim, foram propostos sistemas de cobertura de 20 cm de solo para proteção diária e 60 cm para cobertura final, que deve ainda ser protegida por uma camada vegetal. O trabalho se mostra, assim, um guia básico para os interessados no assunto, podendo ser utilizado principalmente no meio acadêmico em disciplinas que tratem sobre o tema.

Palavras-chave: Aterro Sanitário. Dimensionamento. Estudo de Caso.

ABSTRACT

Despite the advances that have occurred in recent years, the Brazilian scenario of final disposal of waste still points to a delay in relation to developed countries, with 40% of the waste generated being disposed of in controlled landfills and dumps. The sanitary landfill, the only form of environmentally adequate final disposal, is considered a recent structure in the country and, in this context, it faces obstacles such as the lack of references regarding the design and operation of this engineering work. In view of the above, this paper aims to compile the fundamental concepts about the theme of solid waste and landfills and, based on this, propose a case study in which the sizing of a landfill will be performed for the city of Juiz de Fora - MG. To this end, a literature review was carried out selecting the main information and methods used to size the stages of the landfill, as well as an analysis of the current standards and legislation. At the end of the study, through geological, geotechnical and climatological characteristics analysis, it was possible to propose a final geometry for the landfill and a waterproofing system for its base. After this, a rainwater drainage system was proposed using concrete channels with dimensions of 80 x 80 cm. Using the Swiss Method it was possible to size the slurry drainage system, which will be done with drains with diameters of 30 and 40 cm. The gas will be drained through concrete perforated tubes that will be surrounded by rachão type stones. Finally, a covering system of 20 cm of soil was proposed for daily protection and 60 cm for the final covering, which should also be protected by a vegetation layer. The work is, therefore, a basic guide for those interested in the subject, and can be used mainly in the academic environment in subjects that deal with the subject.

Keywords: Landfill. Sizing. Case Study.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Esquema da pesquisa bibliográfica do Capítulo 3	16
Figura 2: Classificação dos resíduos sólidos	19
Figura 3: Participação das regiões na geração dos RSU (%)	22
Figura 4: Esquema de um lixão a céu aberto	23
Figura 5: Lixão da Estrutural	23
Figura 6: Esquema de um aterro controlado	24
Figura 7: Esquema de um aterro sanitário	25
Figura 8: Localização do município de Juiz de Fora	32
Figura 9: Localização da área selecionada para implantação e regiões a serem atendidas	33
Figura 10: Delimitação do terreno escolhido (em vermelho) e curvas de nível do local	34
Figura 11: Composição gravimétrica dos resíduos em Juiz de Fora	37
Figura 12: Composição dos RSD em Juiz de Fora	38
Figura 13: Locação do aterro	43
Figura 14: Vista superior da geometria final do aterro sanitário (cotas em metros) e detalhe em perspectiva	44
Figura 15: Corte longitudinal da geometria final (cotas em metros)	44
Figura 16: Corte transversal da geometria final (cotas em metros)	44
Figura 17: Impermeabilização com geomembrana de PEAD	46
Figura 18: Parâmetros obtidos através do software Plúvio 2.1	50
Figura 19: Área da bacia de contribuição	52

Figura 20: Coeficientes de Manning	54
Figura 21: Seção transversal dos drenos de águas pluviais (cotas em centímetros).....	55
Figura 22: Disposição dos drenos de águas pluviais (drenos destacados em vermelho)	55
Figura 23: Modelo de sistema de drenagem.....	58
Figura 24: Seções transversais — dreno secundário e dreno principal	60
Figura 25: Localização do sistema de drenagem de chorume	60
Figura 26: Sistema de drenagem de lixiviado	61
Figura 27: Dreno de biogás	62
Figura 28: Sistema de drenagem de gás interligado à drenagem de lixiviado	62
Figura 29: Seção transversal do dreno de gás (dimensões em cm)	63
Figura 30: Seção longitudinal dos drenos de gás	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Teor de umidade de componentes dos RSU	20
Tabela 2: Disposição final de RSU no Brasil e suas regiões (t/ano e %)	26
Tabela 3: Número de municípios por tipo de disposição	27
Tabela 4: Dados climatológicos do município de Juiz de Fora	36
Tabela 5: Cálculo da taxa de crescimento geométrico populacional de Juiz de Fora	40
Tabela 6: Projeção da população para os próximos 15 anos	41
Tabela 7: Dados iniciais para projeção da geração de resíduos	42
Tabela 8: Projeção da geração de resíduos	42
Tabela 9: Quantitativos de materiais a serem utilizados na impermeabilização da base	48
Tabela 10: Coeficientes de escoamento superficial (C)	49
Tabela 11: Valores de K para Aplicação do Método Suíço	57
Tabela 12: Condutividade hidráulica.....	58

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos
BNDDES	Banco Nacional do Desenvolvimento
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DEMLURB	Departamento Municipal de Limpeza Urbana
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
FADE	Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da UFPE
NBR	Norma Brasileira
PNRS	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
RSD	Resíduos Sólidos Domésticos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	14
1.2 OBJETIVOS	14
1.3 ESTRUTURA	15
2 METODOLOGIA.....	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	18
3.1.1 CLASSIFICAÇÃO	18
3.1.2 CARACTERÍSTICAS	19
3.1.3 PANORAMA GERAL NO BRASIL.....	21
3.2 DESTINAÇÃO FINAL DOS RSU	22
3.2.1 LIXÕES OU VAZADOUROS	22
3.2.2 ATERRO CONTROLADO	24
3.2.3 ATERRO SANITÁRIO	24
3.2.4 DESTINAÇÃO DOS RSU NO BRASIL.....	26
3.3 NORMATIZAÇÃO E LEGISLAÇÃO	27
4 ESTUDO DE CASO	29
4.1 ESCOLHA DA ÁREA	29
4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	31
4.2.1 TOPOGRAFIA.....	33
4.2.2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA	34
4.2.3 CLIMA.....	35
4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	36
4.3.1 CLASSIFICAÇÃO	36
4.3.2 COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA	37
4.3.3 PESO ESPECÍFICO.....	38
4.4 ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS	38
4.5 GEOMETRIA FINAL	43
4.6 IMPERMEABILIZAÇÃO DA BASE.....	44
4.7 DRENAGEM SUPERFICIAL	48
4.8 DRENAGEM DE CHORUME	56
4.8.1 ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE LIXIVIADOS.....	56
4.8.2 SISTEMA DE DRENAGEM.....	57

4.9 DRENAGEM DE GÁS	61
4.10 COBERTURA	64
4.10.1 COBERTURA DIÁRIA.....	65
4.10.2 COBERTURA FINAL.....	65
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	66
REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Com o avanço da industrialização e crescimento populacional nas últimas décadas, houve um grande aumento na taxa de geração de resíduos sólidos urbanos (RSU). A partir disso, iniciou-se uma busca por alternativas para minimizar a geração e os efeitos causados pela disposição destes resíduos (NASCIMENTO, 2007).

No Brasil, de acordo com dados da Abrelpe, no ano de 2020 foram gerados aproximadamente 82,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos. A gestão e a disposição inadequada destes resíduos causam impactos ambientais e sociais, tais como a contaminação do solo e dos recursos hídricos, poluição atmosférica, geração de odores e proliferação de vetores, afetando diretamente o meio ambiente e a saúde pública (ABRELPE, 2021).

Dentre as formas de disposição dos RSU, os mais comuns são os lixões, os aterros controlados e os aterros sanitários. Neste contexto, o aterro sanitário, além de se mostrar uma alternativa economicamente viável, constitui a forma mais segura para destinação dos resíduos, garantindo a proteção dos recursos hídricos, do solo e do ar (NASCIMENTO, 2007).

A conscientização da necessidade de uma obra de Engenharia que possibilite o descarte correto e reduza os impactos ambientais causados pela geração dos resíduos sólidos é recente no Brasil. Exemplo disto é a Lei nº 12305, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos no ano de 2010, visando a construção de novos aterros sanitários e o fim da disposição inadequada dos RSU. Entretanto, ainda existem cerca de 3000 municípios que descartam seus resíduos de forma incorreta (ABRELPE, 2021).

O panorama atual, atrelado a legislações tão recentes, contribui para uma escassez de estudos e informações a respeito dos projetos básico e executivo e operação dos aterros sanitários. Logo, faz-se necessário o desenvolvimento de estudos e pesquisas que visem contribuir com mais informações acerca destas obras.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho possui como objetivo compilar conceitos e fundamentos necessários para realização de projetos de aterros sanitários. Desta maneira, através da elaboração de um estudo de caso que aborde o dimensionamento de alguns de seus elementos de projeto, pretende-se

reunir informações acerca desta obra de Engenharia, desde a escolha da área de implantação até suas camadas de cobertura.

1.3 ESTRUTURA

O presente trabalho está estruturado em 5 capítulos, que foram divididos da seguinte maneira:

1. O primeiro capítulo apresenta uma breve contextualização do assunto abordado e os principais objetivos do trabalho. A partir desse capítulo é possível perceber as motivações da autora, tendo em vista a relevância do tema escolhido.
2. O capítulo 2 aborda a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho, que contempla uma revisão bibliográfica dos principais assuntos tratados e a coleta de informações do município de Juiz de Fora. Neste caso, estes dados foram obtidos por meio de *softwares*, sites e plataformas oficiais, ou através de registros de pesquisas já realizadas.
3. O Capítulo 3 apresenta uma contextualização mais aprofundada do assunto “Resíduos Sólidos Urbanos”, através de uma revisão bibliográfica que sustenta a pesquisa realizada. Neste capítulo são apresentados conceitos fundamentais para o entendimento do tema e que dão embasamento para o projeto realizado nos capítulos seguintes.
4. Já no Capítulo 4, é apresentado um Estudo de Caso, no qual é realizado o dimensionamento das principais etapas de um aterro sanitário, desde a escolha da área de implantação até suas camadas de cobertura. Neste capítulo são apresentados alguns dos principais métodos utilizados para projeto e dimensionamento desta obra de Engenharia.
5. Por fim, o Capítulo 5 traz as considerações finais do trabalho e sugestões para pesquisas futuras, tendo em vista a abrangência do tema estudado.

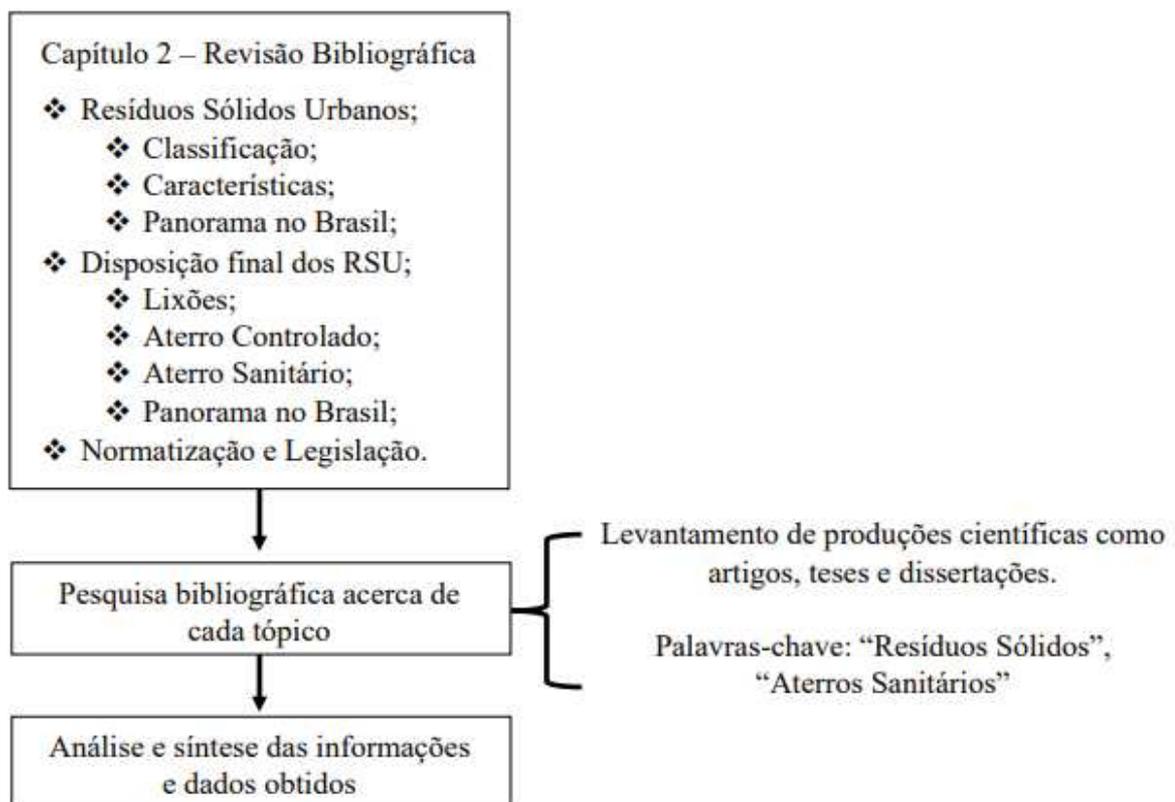
2 METODOLOGIA

A primeira parte da pesquisa é baseada em uma revisão bibliográfica, na qual são explorados diversos conceitos acerca da temática do Resíduos Sólidos Urbanos, como suas principais características, métodos de disposição final e normas que regem o gerenciamento destes resíduos.

Severino (2016) define a pesquisa bibliográfica como aquela realizada a partir de registros de pesquisas anteriores, disponíveis em teses, artigos e livros. Desta forma, as informações e dados utilizados foram coletados através do levantamento de produções científicas disponíveis para consulta nos meios digitais.

A Figura 1 apresenta um esquema da pesquisa bibliográfica realizada no Capítulo 3.

Figura 1: Esquema da pesquisa bibliográfica do Capítulo 3



Fonte: Autora (2022)

O Estudo de Caso apresentado no Capítulo 4 foi realizado com base em produções científicas e projetos reais de aterros sanitários. Para o desenvolvimento do projeto, foram necessárias diversas informações do município de Juiz de Fora. Algumas dessas informações foram obtidas

através de sites e plataformas oficiais como IBGE e o site da própria Prefeitura Municipal, além de dados contidos em trabalhos já publicados. Além disso, foram utilizados alguns *softwares* como QGIS, *Google Earth*, AutoCAD e Plúvio 2.1 para obtenção de dados topográficos e pluviométricos da região.

No entanto, para obter algumas informações locais seriam necessários ensaios realizados *in loco* ou em laboratórios, o que se mostrou inviável neste trabalho. Desta forma, alguns dados e parâmetros utilizados no projeto foram estimados ou definidos com base em literaturas disponíveis.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

De acordo com a norma NBR 10004 (2004), resíduos sólidos são:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004, p.1).

De modo geral, os resíduos sólidos urbanos (RSU) são aqueles provenientes de atividades domésticas (resíduos domiciliares) e os oriundos dos serviços de limpeza urbana, coletados através da coleta convencional e/ou seletiva em uma determinada área, tendo como responsabilidade o município. Também são considerados RSU aqueles resíduos comerciais e industriais, desde que apresentem características e volume similares aos resíduos domiciliares (ZANTA E FERREIRA, 2003).

3.1.1 CLASSIFICAÇÃO

De acordo com Queiroz (2010), os resíduos podem ser classificados de acordo com sua origem, o estado físico, as características físicas, a composição química, a patogenicidade, a toxidez e a periculosidade.

A norma brasileira NBR 10004 (2004) classifica os resíduos sólidos de acordo com sua periculosidade, que pode ser entendida como uma característica em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, capaz de apresentar risco à saúde pública ou ao meio ambiente quando gerenciados de maneira inadequada. Dessa forma, os resíduos podem ser classificados em:

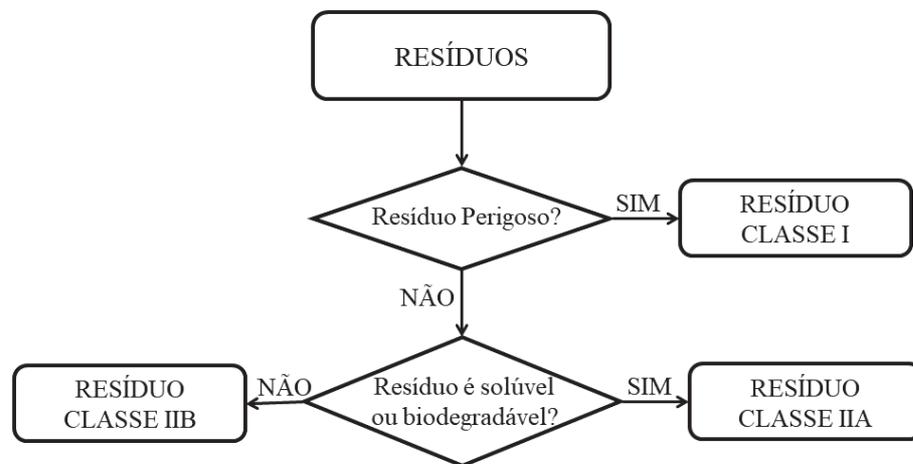
- I. Resíduos Classe I – Perigosos: apresentam periculosidade ou possuem uma ou mais das seguintes propriedades: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;
- II. Resíduos Classe II A – Não Perigosos e Não Inertes: Não se enquadram nas classificações de Classe I nem Classe II B. Podem, ainda, apresentar propriedades como

biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água. No geral, são os resíduos com as características do lixo doméstico ou comum.

- III. Resíduos Classe II B – Não Perigosos e Inertes: quando submetido aos testes de solubilização não têm seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água.

A Figura 2 apresenta um esquema com a classificação dos resíduos.

Figura 2: Classificação dos resíduos sólidos



Fonte: Autora (2022)

3.1.2 CARACTERÍSTICAS

As características dos RSU são extremamente diversas, complexas e heterogêneas e sofrem influência direta do município. Os aspectos sociais, culturais e econômicos da região interferem na geração dos resíduos, afetando a quantidade gerada e sua composição. O conhecimento destas características pode ser obtido em qualquer etapa do gerenciamento, e essas informações podem auxiliar na atribuição de responsabilidades nas esferas federal, estadual e municipal (BARROS, 2012).

3.1.2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

- I. Geração per capita: diz respeito à quantidade de resíduos geradas diariamente em relação ao número de habitantes. Pode ser mensurado a partir de dados locais, regionais ou nacionais (BARROS, 2012);

- II. **Composição Gravimétrica:** define o percentual de cada componente dos resíduos sólidos em relação ao peso total da amostra. Pode ser considerada uma das características mais influentes nas propriedades geomecânicas dos resíduos, sendo que o teor de materiais orgânicos ou putrescíveis tem influência direta na geração de gases e chorume, no desenvolvimento de pressões neutras, no teor de umidade, na compressibilidade e resistência ao cisalhamento dos maciços. É válido ressaltar também que a composição gravimétrica varia de acordo com as características sócio-culturais da região, de modo que regiões mais desenvolvidas tendem a gerar menos resíduos orgânicos que regiões menos desenvolvidas, por exemplo (BOSCOV, 2008).
- III. **Teor de Umidade:** pode ser definido pela relação entre a massa de água e a massa seca. É um parâmetro muito importante no estudo da velocidade de degradação dos resíduos e, conseqüentemente, das pressões neutras e recalques desenvolvidos nos maciços — influenciando diretamente em sua estabilidade. No entanto, é um parâmetro de difícil determinação, tendo em vista a heterogeneidade dos materiais componentes e também a variação da umidade que ocorre em função da profundidade, pluviometria e condições de drenagem interna e superficial do maciço (BOSCOV, 2008). Na Tabela 1, são apresentados teores de umidade de diferentes materiais que compõem os RSU.

Tabela 1: Teor de umidade de componentes dos RSU

Material	Teor de Umidade (%)
Metais	19,6
Papel	74,8
Vidro	5,9
Plástico	41,5
Borracha	24,5
Madeira	69,8
Material putrescível	47,0

Fonte: Limpurb (1997), *apud* Boscov (2008)

- IV. **Peso específico:** O peso específico dos resíduos depende de uma série de fatores, podendo-se destacar: composição, compactação e degradação com o tempo (MARQUES, 2001). Não existem ensaios normalizados para determinação do peso específico dos resíduos. Geralmente, essa caracterização é feita através de um ensaio *in situ*, mediante a retirada de uma amostra de material de uma vala, seguida da pesagem desta amostra e cálculo do volume da vala (BOSCOV, 2008). No Quadro 1 são apresentados alguns valores de peso específico dos RSU.

Quadro 1 – Peso específico dos RSU

Fonte	Peso Específico (kN/m³)
Benvenuto e Cunha (1991)	Condição drenada: 10 Condição saturada: 13
Santos e Presa (1995)	Resíduos recém-lançados: 7 Após ocorrência de recalques: 10
Kaimoto e Cepollina (1996)	Resíduos novos, não decompostos e pouco compactados: 5 a 7 Após compactação e ocorrência de recalques: 9 a 13
Mahler e Iturri (1998)	10,5 (seção com 10 meses de alteamento)
Abreu (2000)	Resíduos soltos: 1,5 a 3,5 Resíduos medianamente densos: 3,5 a 6,5 Resíduos densos: 6,5 a 14

Fonte: Boscov (2008)

- V. Permeabilidade: Pode ser definida como a maior ou menor facilidade que o maciço oferece à passagem de líquidos. No caso dos RSU, é um parâmetro de extrema importância para o dimensionamento dos sistemas de drenagem interna de chorume e gás dos aterros sanitários (NASCIMENTO, 2007). Através do valor obtido para a permeabilidade do resíduo é possível fazer previsões a respeito da estabilidade do maciço, uma vez que baixas permeabilidades levam à geração de bolsões de gás e chorume e, conseqüentemente, ao aumento das pressões neutras (BOSCOV, 2008). Diversos estudiosos publicaram dados referentes à condutividade hidráulica dos RSU, e os resultados obtidos mostram que o coeficiente de permeabilidade, geralmente, varia de 10^{-4} m/s a 10^{-6} m/s que, quando comparado aos coeficientes de permeabilidade dos solos, equivalem a areias finas e limpas, revelando, assim, tendências a um comportamento drenante (CARVALHO, 1999).

3.1.3 PANORAMA GERAL NO BRASIL

A geração de RSU possui relação direta com o local onde se desenvolvem atividades humanas, e é resultado direto do poder aquisitivo e do consumo de bens e produtos diversos na região. No Brasil, de acordo com dados da Abrelpe, no ano de 2020 foram gerados cerca de 82,5 milhões de toneladas de resíduos, o que equivale a 225.965 toneladas diárias ou ainda, 1,07 kg de resíduo/dia/habitante (ABRELPE, 2021).

Em âmbitos regionais, dados apontam que a região Sudeste possui a maior geração de resíduos, com cerca de 113 mil toneladas diárias e 460 kg/habitante/ano; seguida da região Nordeste, que é responsável por aproximadamente 25% dos RSU do país. A região com menor participação é

a Norte, que representa aproximadamente 4% do total gerado e 328 kg/habitante/ano (ABRELPE, 2021). A Figura 3 apresenta a participação das regiões na geração dos RSU no Brasil no ano de 2020.

Figura 3 - Participação das regiões na geração dos RSU (%)



Fonte: Abrelpe (2021)

3.2 DESTINAÇÃO FINAL DOS RSU

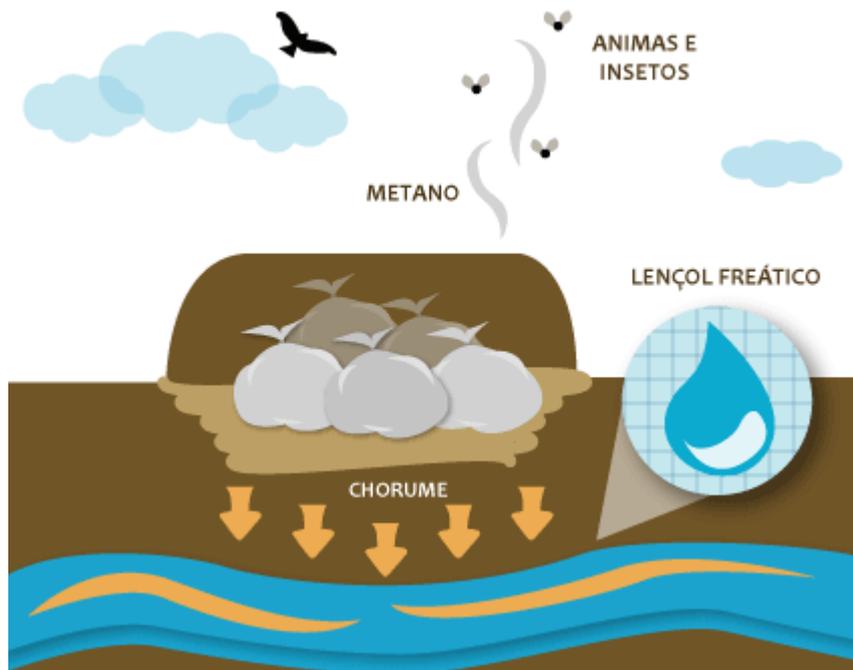
Dentro da perspectiva do gerenciamento dos resíduos, a destinação final constitui a última etapa dos processos relacionados a estes materiais. É importante ressaltar que, neste ponto, a implantação de políticas públicas que visem a redução da geração de resíduos, seu reuso e reciclagem são fundamentais, uma vez que são diversos os problemas atrelados à disposição final destes resíduos. De modo geral, os métodos mais comuns para disposição dos RSU são: lixões ou vazadouros, aterros controlados e aterros sanitários (NASCIMENTO, 2007).

3.2.1 LIXÕES OU VAZADOUROS

Constituem uma forma inadequada de disposição dos resíduos sólidos, nos quais a descarga é feita a céu aberto sem qualquer tipo de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública (BOSCOV, 2008). A Figura 4 ilustra a estrutura de um lixão a céu aberto. Por não receber camadas de proteção antes da disposição dos resíduos, o solo e as águas subterrâneas sofrem processos de contaminação; e a ausência de camadas de cobertura facilita a proliferação de

vetores e doenças, que afetam principalmente a população que vive no entorno da área utilizada e os catadores locais, como mostrado na Figura 5 (SILVA, 2016).

Figura 4: Esquema de um lixão a céu aberto



Fonte: Ecoarquitetura (2010)

Figura 5: Lixão da Estrutural



Fonte: O Eco (2018)

3.2.2 ATERRO CONTROLADO

Segundo Righi (2017), é uma forma de disposição que leva em consideração algumas precauções como o recobrimento dos resíduos com solo e, em algumas situações, a drenagem de águas pluviais. No entanto, não dispõe de impermeabilização da base e nem de sistemas de tratamento de lixiviado ou do biogás gerado. Apesar de preferíveis aos lixões, os aterros controlados não são considerados ideais por comprometerem a qualidade do solo e das águas subterrâneas. Na Figura 6 é possível observar o esquema de um aterro controlado.

Figura 6: Esquema de um aterro controlado



Fonte: Ecoarquitetura (2010)

3.2.3 ATERRO SANITÁRIO

Segundo a NBR 8419 (1992), o aterro sanitário de resíduos consiste na:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário (ABNT, 1992, p.1).

Uma outra definição para os aterros sanitários é que constituem uma forma de disposição dos resíduos sólidos no solo, que, baseada em fundamentos da engenharia e normas operacionais,

permite o confinamento seguro dos resíduos, garantindo proteção à saúde pública e controle da poluição (VILHENA, 2018).

Nesta forma de destinação, diversos elementos devem ser projetados com base em normas e critérios de engenharia, como sistemas de impermeabilização de base, drenagem de águas superficiais, líquidos e gases gerados na decomposição dos resíduos, cobertura dos resíduos, tratamento dos lixiviados e outros. Esse conjunto visa garantir a estabilidade e segurança do aterro, bem como a redução de riscos à saúde da população e a minimização dos impactos ambientais (FADE/BNDES, 2014).

A Figura 7 ilustra um modelo de aterro sanitário.

Figura 7: Esquema de um aterro sanitário



Fonte: Ecoarquitetura (2010)

As normas brasileiras fazem uma classificação dos aterros de acordo com seu porte. Os aterros considerados de pequeno porte são aqueles que recebem até 20 toneladas de resíduo por dia (ABNT, 2010).

Ainda de acordo com a NBR 15849 (2010), é possível classificar os aterros quanto ao seu método de aterramento:

- I. Aterros em valas: são aqueles em escavação com profundidade limitada e largura variável, confinada em todos os lados;

- II. Aterros em trincheiras: aqueles com escavação sem limitação de profundidade e largura, que se caracterizam por confinamento em três lados e operação mecanizada;
- III. Aterros em encostas: aqueles com disposição no solo caracterizada pelo uso de taludes pré-existentes, usualmente implantados em áreas de ondulações ou depressões naturais e encostas de morros;
- IV. Aterros em área: aqueles com disposição no solo, caracterizados pela disposição em áreas planas acima da cota do terreno natural.

3.2.4 DESTINAÇÃO DOS RSU NO BRASIL

O tratamento dos resíduos sólidos urbanos no Brasil sempre teve uma grande influência das tecnologias desenvolvidas em outros países (FADE/BNDES, 2014). Atualmente, a maior parte dos RSU coletados tem uma destinação adequada — disposição em aterros sanitários — com 46 milhões de toneladas enviadas para esses locais em 2020, correspondendo a mais de 60% dos resíduos coletados no país. No entanto, áreas de disposição inadequada, incluindo lixões e aterros controlados, ainda são uma realidade presente no Brasil, recebendo cerca de 40% de todo resíduo gerado (ABRELPE, 2021).

As Tabelas 2 e 3 apresentam dados sobre as formas de disposição final de resíduos no Brasil de acordo com as regiões.

Tabela 2: Disposição final de RSU no Brasil e suas regiões (t/ano e %)

Região	Disposição adequada		Disposição inadequada	
	t/ano	%	t/ano	%
Norte	1.773.927	35,6	3.209.013	64,4
Nordeste	6.016.948	36,3	10.558.666	63,7
Centro-Oeste	2.456.849	42,5	3.323.972	57,5
Sudeste	29.542.830	73,4	10.706.257	26,6
Sul	6.011.894	70,8	2.479.482	29,2
Brasil	45.802.448	60,2	30.277.390	39,8

Fonte: Abrelpe (2021)

Tabela 3: Número de municípios por tipo de disposição

Regiões	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul	Brasil
Adequada	96	511	172	862	1.061	2.702
Inadequada	354	1.283	295	806	130	2.868
Total	450	1.794	467	1.668	1.191	5.570

Fonte: Abrelpe (2021)

Em 2010, foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que decretava o fim das formas inadequadas de disposição de resíduos até o ano de 2014. No entanto, apesar dos grandes avanços ocorridos desde então, as Tabelas 2 e 3 mostram que o objetivo ainda está longe de ser alcançado.

3.3 NORMATIZAÇÃO E LEGISLAÇÃO

No Brasil, os principais marcos legais da política pública nacional, no que diz respeito aos resíduos sólidos urbanos, são a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) — instituída em 2007, que previa a universalização do acesso e efetiva prestação dos serviços de saneamento básico para todos os domicílios — e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) — estabelecida em 2010, que determina a melhor maneira para que os setores públicos e privados lidem com os RSU, visando a redução da geração e o descarte correto dos rejeitos (FADE/BNDES, 2014).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), também dispõe de algumas resoluções relacionadas ao gerenciamento de resíduos. A Resolução nº 1, prescreve sobre critérios básicos para o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto Ambiental (Rima), determinando sua obrigatoriedade para atividades que modificam o meio ambiente (BOSCOV, 2008).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) também possui algumas normas relativas a aterros de resíduos, como:

- ❖ NBR 8419 (1992), que normatiza os projetos de aterros sanitários de RSU;
- ❖ NBR 10157 (1987), que apresenta critérios para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos perigosos;

- ❖ NBR 13896 (1997), que apresenta critérios para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos;
- ❖ NBR 15113 (2004), que apresenta critérios para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes; e
- ❖ NBR 15849 (2010), que apresenta os requisitos mínimos para implantação, projeto, operação e encerramento de aterros sanitários de pequeno porte.

Verifica-se, desta forma, certa preocupação por parte das entidades públicas com a temática dos resíduos sólidos. Entretanto, apesar da expectativa de adequação dos estados e municípios do país aos modelos de destinação correta para os resíduos, a existência das políticas citadas ainda não foi suficiente para conseguir influenciar de forma efetiva, em curto prazo, uma mudança na realidade dos municípios brasileiros (COSTA, 2016).

É necessário ressaltar também que grande parte das legislações são, de certa forma, antigas — anteriores à 2010. Com o avanço das tecnologias e o crescimento de pesquisas e discussões acerca do assunto, é indispensável que as normas e leis que regem o gerenciamento de resíduos sejam constantemente atualizadas e que suas implantações sejam cobradas efetivamente dos gestores municipais e estaduais.

4 ESTUDO DE CASO

O presente capítulo aborda a elaboração de um estudo de caso que visa compilar as principais informações e métodos utilizados em projetos de aterros sanitários, desde a escolha da sua área de implantação, passando pelo dimensionamento de elementos de projeto como impermeabilização da base e sistemas de drenagem, até a definição suas camadas de cobertura.

Para realização deste estudo de caso, foram utilizadas informações do município de Juiz de Fora, localizado na Zona da Mata mineira. Conforme já citado no Capítulo 2, alguns dados utilizados são reais, enquanto outros foram estimados ou baseados em referências bibliográficas.

4.1 ESCOLHA DA ÁREA

Os primeiros estudos realizados para implantação de um aterro sanitário estão relacionados à área a ser utilizada para o descarte dos resíduos. Nesta etapa, é fundamental levar em consideração características dos meios físico, biótico e socioeconômico da área para instalação do aterro sanitário, a fim de minimizar os riscos ao meio ambiente e à saúde pública, mas, também, reduzir gastos com preparo, operação e encerramento do aterro (VILHENA, 2018).

Diversas vezes, as prefeituras já dispõem de algumas possíveis áreas para implantação de um aterro sanitário. Normalmente, são áreas já de sua propriedade — cavas de mineração, pedreiras desativadas, áreas de empréstimo, etc. — que, se confirmada sua aptidão, minimizam os custos de implantação e dispensam o tempo necessário para desapropriação de terras (VILHENA, 2018).

A NBR 13896/1997 traz algumas recomendações técnicas acerca da área escolhida para implantação de um aterro, a saber:

- ❖ Topografia: recomendam-se locais com declividade superior a 1% e inferior a 30%;
- ❖ Geologia e Solos: desejável a existência de um depósito natural extenso e homogêneo de materiais com coeficiente de permeabilidade menor que 10^{-6} cm/s e zona não saturada com espessura superior a 3,0 m;
- ❖ Recursos Hídricos: recomenda-se uma distância mínima de 200 m entre o aterro e qualquer curso d'água;

- ❖ Dimensão e vida útil: recomenda-se a construção de aterros com vida útil mínima de 10 anos;
- ❖ Distância mínima a núcleos populacionais: recomenda-se uma distância mínima de 500 m entre o aterro e núcleos populacionais.

Além das recomendações supracitadas, a norma estabelece algumas obrigatoriedades para implantação do aterro:

- ❖ O aterro não deve estar localizado em áreas sujeitas a inundações, em períodos de recorrência de 100 anos;
- ❖ Entre o ponto mais baixo do aterro e o ponto mais alto do lençol freático — medido durante a temporada de maior precipitação — deve haver uma camada natural mínima de 1,50 m de solo insaturado;
- ❖ O material do subsolo deve apresentar coeficiente de permeabilidade inferior a 5×10^{-5} cm/s;
- ❖ Deve-se observar a legislação de uso do solo do local a ser utilizado.

Vilhena (2018) propõe uma forma de comparação entre áreas pré-selecionadas, a fim de determinar a mais apta a receber o aterro sanitário. Esta comparação é feita utilizando algumas informações dispostas nos quadros a seguir, de forma que, o Quadro 3 é preenchido de acordo com a classificação de cada uma das áreas em cada requisito como “Possível”, “Adequada” ou “Não recomendada” de acordo com os critérios do Quadro 2.

Quadro 2 - Critérios para instalação de um aterro sanitário

Dados necessários	Classificação das áreas		
	Possível	Adequada	Não recomendada
Vida útil	Maior que 10 anos		Menor que 10 anos
Distância ao centro atendido	5 - 20 km		Menor que 5 km Maior que 20 km
Zoneamento ambiental	Áreas sem restrições no zoneamento ambiental		Unidades de conservação e correlatas
Zoneamento urbano	Vetor de crescimento mínimo	Vetor de crescimento intermediário	Vetor de crescimento principal
Densidade populacional	Baixa	Média	Alta
Uso e ocupação das terras	Áreas devolutas ou pouco utilizadas		Ocupação intensa
Valor da terra	Baixo	Médio	Alto
Aceitação da população e de entidades ambientais não governamentais	Boa	Razoável	Oposição severa
Declive do terreno (%)	3 < declividade < 20	20 < declividade < 30	Declividade < 3 ou declividade > 30
Distância aos cursos d'água (córregos, nascentes, etc.)	Maior que 200 m	Menor que 200 m com aprovação do órgão ambiental responsável	

Fonte: Vilhena (2018)

Quadro 3 - Dados para avaliação das áreas pré selecionadas

Dados necessários	Áreas disponíveis		
	Área 1	Área 2	Área 3
Vida útil			
Distância ao centro atendido			
Zoneamento ambiental			
Zoneamento urbano			
Densidade populacional			
Uso e ocupação das terras			
Valor da terra			
Aceitação da população e de entidades ambientais não governamentais			
Declive do terreno (%)			
Distância aos cursos d'água (córregos, nascentes, etc.)			

Fonte: Vilhena (2018)

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Juiz de Fora se encontra no estado de Minas Gerais, próximo à divisa com o estado do Rio de Janeiro, na região conhecida como Zona da Mata. Com cerca de 570 mil habitantes, abrange uma área de aproximadamente 1.430 km² e ocupa lugar de destaque no estado de Minas em qualidade de vida e investimentos (PJF, 2022). A Figura 8 mostra a localização do município, que faz divisa com Lima Duarte, Santos Dumont, Ewbank da Câmara, Bicas, Matias Barbosa, Belmiro Braga, Coronel Pacheco e Chácara. Além do centro urbano de Juiz de Fora, o município conta com alguns distritos, como Torreões, Humaitá, Monte Verde, Penido, entre outros.

Figura 8: Localização do município de Juiz de Fora

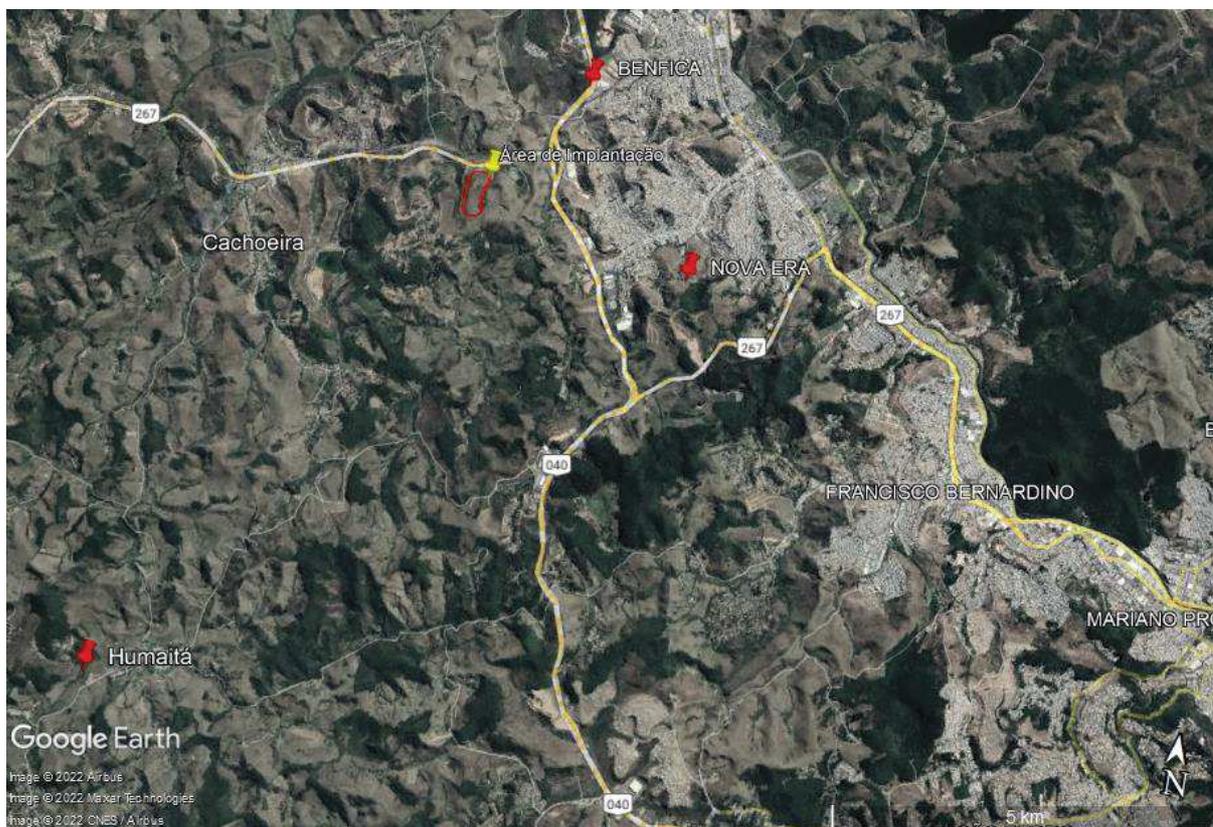


Fonte: Adaptado de *QGis* (2022)

Inicialmente, a atividade econômica predominante era a produção cafeeira, que mais tarde foi substituída pelo desenvolvimento da pecuária leiteira e pela indústria de laticínios. Depois, o município passou por avanços no âmbito industrial — principalmente nos setores têxtil, da indústria mecânica, da indústria automobilística e do beneficiamento de produtos alimentícios —, que lhe deu o cognome “Manchester Mineira” (NASCIMENTO, 2001).

Tendo em vista o extenso território do município de Juiz de Fora e sua volumosa população, optou-se por realizar o estudo de caso considerando apenas alguns locais do município, a fim de reduzir a área necessária para construção do aterro sanitário. Desta forma, o aterro em estudo será projetado de forma a atender os bairros Benfica e Santa Cruz, bem como o distrito de Humaitá. A Figura 9 mostra a área selecionada e os locais que serão atendidos após a construção do aterro sanitário.

Figura 9: Localização da área selecionada para implantação e regiões a serem atendidas



Fonte: Adaptado de *Google Earth* (2022)

A área escolhida para implementação do aterro sanitário se encontra próxima ao bairro Igrejinha e possui uma extensão de 13,6 hectares — aproximadamente 136000 m². Seu principal acesso se dá pela BR 267, que atravessa importantes municípios no estado de Minas Gerais como Juiz de Fora, Caxambu e Poços de Caldas. Os principais centros urbanos se localizam aproximadamente a 15 km da área do aterro.

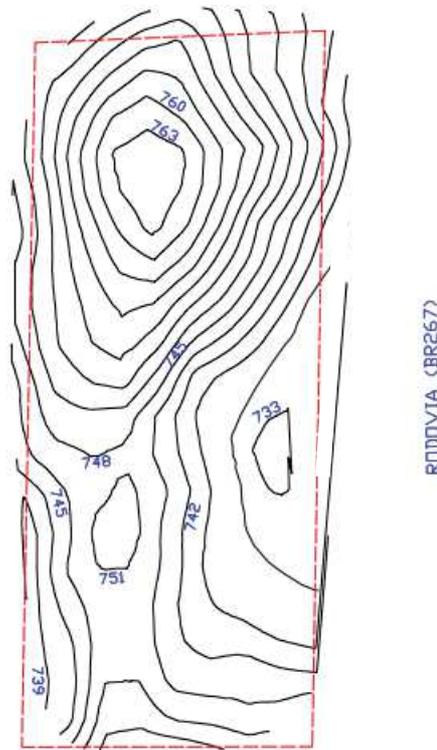
4.2.1 TOPOGRAFIA

O relevo predominante no município é do tipo “mar de morros”, caracterizado por apresentar altitudes entre 700 e 900 metros, e declividades entre 12 e 30%. As planícies estão inseridas ao longo do Rio do Peixe e Paraibuna — na região central —, enquanto as encostas com maiores declividades se encontram a Oeste, Sul e Leste do município (NASCIMENTO, 2001).

A área escolhida para implantação do aterro possui uma declividade média de 15%, considerada adequada de acordo com os requisitos impostos pelas normas brasileiras. A diferença máxima

entre as cotas é de 30 metros — entre as cotas 763 e 733. A Figura 10 apresenta a delimitação do terreno escolhido e suas curvas de nível.

Figura 10: Delimitação do terreno escolhido (em vermelho) e curvas de nível do local



Fonte: Adaptado de *Google Earth, QGis e AutoCAD* (2022)

4.2.2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA

Rocha (2005 apud ANDRADE, 2015) retrata que o município de Juiz de Fora se encontra sobre rochas diversas, tendo como base os domínios geológicos do Complexo Juiz de Fora e Complexo Mantiqueira.

De forma geral, estes domínios apresentam grande variedade de rochas metamórficas, com elevada resistência e dureza. O Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de Juiz de Fora ainda aponta que, devido à idade, estas rochas foram expostas a falhas, fraturas e dobramentos (PDDU, 2004 apud ANDRADE, 2015).

No que diz respeito aos aspectos geotécnicos e geológicos da região, por falta de dados do local, optou-se por utilizar as análises de Nascimento (2001), que realizou alguns estudos nas proximidades da área selecionada para implantação do aterro. Com relação à geologia local, é possível observar a presença de bandamentos gnáissicos e a intensa alternância de leitos

leucocráticos (predominância de quartzos e feldspatos), mesocráticos (feldspatos, quartzo, piroxênios e biotita) e melanocráticos (biotita e hornblenda).

No que tange aos aspectos geotécnicos, Nascimento (2001) relata que as sondagens — à trado e à percussão — realizadas no local revelaram que a camada superficial apresenta uma espessura variável de 1 a 7 metros, e é composta por solos de textura argilo-siltosa e areia fina. O nível de água não foi encontrado até 20 metros de profundidade nas sondagens à percussão realizadas.

Os ensaios de granulometria utilizados nesse caso para representar a área do aterro revelaram solos formados predominantemente por argila e silte (entre 50 e 75%), areia fina (aproximadamente 20%) e areia grossa (entre 5 e 10%). Foram realizados também ensaios de permeabilidade em amostras deformadas e indeformadas, extraídas a profundidades de 1,5 a 1,9 metros, que resultaram em coeficientes de permeabilidade variando entre $1,24 \times 10^{-3}$ m/s e $5,9 \times 10^{-5}$ m/s. Tais resultados indicam solos bastante irregulares quanto à sua permeabilidade, apresentando regiões com alta permeabilidade e regiões com baixa permeabilidade (NASCIMENTO, 2001).

4.2.3 CLIMA

De uma maneira geral, a chamada fase líquida do aterro sanitário é aquela composta pelos líquidos percolados, também conhecidos como lixiviado. Dentre os diversos fatores que influenciam a quantidade e a qualidade do lixiviado a ser produzido no aterro, destaca-se a precipitação pluviométrica. Em meses com alto índice de chuvas, é possível observar o aumento no nível de líquidos percolados no interior do maciço, ao passo que em meses de seca, ou ainda em regiões onde a evapotranspiração supera a precipitação, a quantidade de percolados é significativamente menor, sendo algumas vezes quase inexistente (PAES, 2003).

Desta forma, tendo em vista a grande importância da precipitação pluviométrica no processo de geração do lixiviado, é fundamental que no processo de construção de um aterro sanitário seja realizado um estudo preliminar das condições meteorológicas predominantes na região. A não realização desta investigação pode acarretar em problemas futuros na estabilidade do aterro e até mesmo na paralisação de suas atividades (SOUZA, 2011).

A NBR 15849 (2010) traz alguns aspectos climatológicos que devem ser considerados durante o dimensionamento do aterro sanitário. Entre eles estão os índices de precipitação e

temperaturas, umidade relativa do ar, evapotranspiração e excedente hídrico, e tais informações são passíveis de serem encontradas na estação meteorológica mais próxima à área ou em dados disponibilizados por instituições especializadas em meteorologia.

As informações referentes ao município de Juiz de Fora estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Dados climatológicos do município de Juiz de Fora

Mês	Temperatura (°C)	Precipitação (mm)	Evapotranspiração Real (mm)	Excedente Hídrico (mm)
Janeiro	22,3	300	106	194
Fevereiro	22,5	217	98	119
Março	21,1	198	91	107
Abril	19,8	107	74	33
Maio	18,2	65	61	4
Junho	17,1	34	49	0
Julho	16,4	27	42	0
Agosto	17,5	16	39	0
Setembro	17,3	50	52	0
Outubro	18,5	112	68	0
Novembro	19,6	191	78	101
Dezembro	20,9	327	95	232
Média	19,3	137	71	66
Total	-	1644	853	790

Fonte: Embrapa (período de 1973-1990)

Conforme ilustrado acima, a precipitação anual na região é de 1.644 mm com distribuição irregular ao longo do ano, sendo o mês de dezembro o mais chuvoso e agosto o mês com menor índice pluviométrico. A temperatura anual média é de 19,3°C, com mínima de 16,4°C (em julho) e máxima de 22,5°C (em fevereiro). A evapotranspiração real anual (853 mm) é inferior a precipitação anual (1.644 mm), indicando um excedente hídrico anual de 790 mm.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

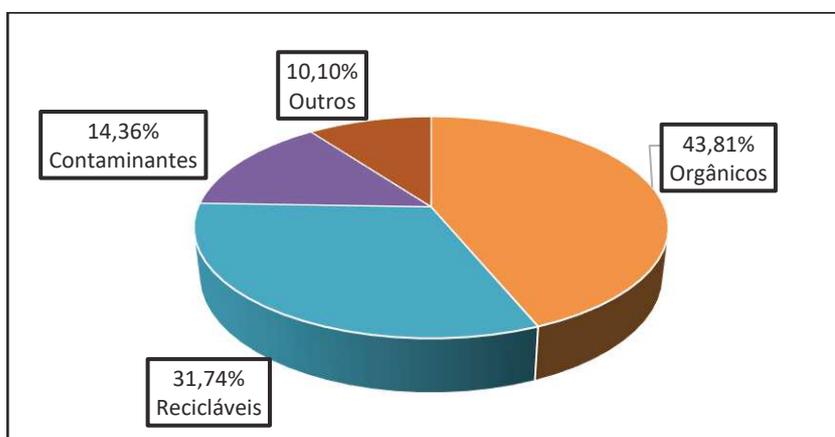
4.3.1 CLASSIFICAÇÃO

O projeto do aterro sanitário em estudo prevê o recebimento de resíduos sólidos domésticos e comerciais, classificados como resíduos Classe II A (não perigosos e não inertes) de acordo com a norma NBR 10004 (2004).

4.3.2 COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA

De acordo com estudos realizados no ano de 2016 pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) juntamente com o Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DEMLURB), os resíduos no município de Juiz de Fora possuem, aproximadamente, a seguinte distribuição: 43,81% são resíduos de origem orgânica, 31,74% são resíduos passíveis de reciclagem, 14,36% são compostos por resíduos potencialmente contaminantes e 10,10% são rejeitos diversos (MENEZES et al., 2019). A composição gravimétrica da região está apresentada na Figura 11.

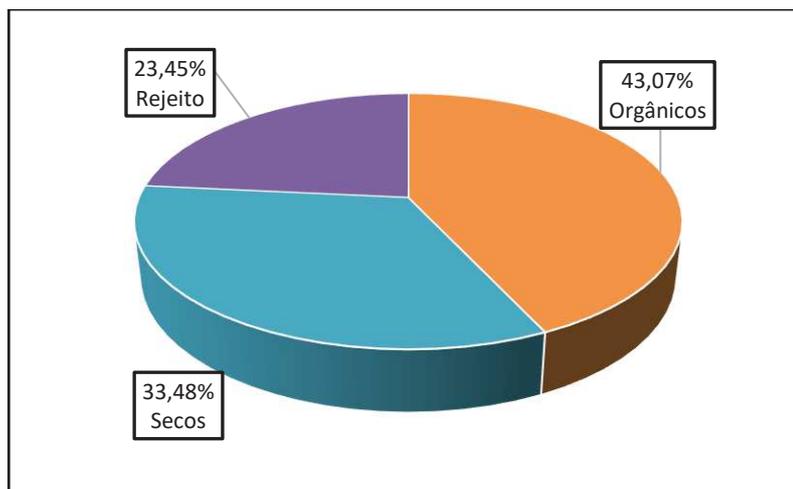
Figura 11: Composição gravimétrica dos resíduos em Juiz de Fora



Fonte: Adaptado de Menezes et al. (2019)

A prefeitura de Juiz de Fora (PJF) também disponibiliza o resultado de um estudo feito no ano de 2020. A Figura 12 retrata a distribuição gravimétrica obtida para os resíduos sólidos domiciliares (RSD).

Figura 12: Composição dos RSD em Juiz de Fora



Fonte: Adaptado de PJF (2020)

4.3.3 PESO ESPECÍFICO

O peso específico dos resíduos sólidos de Juiz de Fora será estimado com base em referências presentes na literatura.

Por meio de um monitoramento experimental, Marques (2001) observou uma grande variação nos pesos específicos dos resíduos compactados, com valores entre 3,4 e 14,0 kN/m³, apresentando valor médio de aproximadamente 8,2 kN/m³.

Gomes et al (1997 *apud* CATAPRETA, 2008) descrevem que o peso específico dos resíduos varia de 1,0 a 3,0 kN/m³ para resíduos soltos e de 7,0 a 9,0 kN/m³ para resíduos compactados. Os autores mencionam ainda que esses valores podem também variar em função de processos físicos e biológicos que ocorrem com o tempo, podendo chegar a 13 kN/m³.

Desta forma, considerando que os resíduos em Juiz de Fora serão medianamente compactados por máquinas de pequeno/médio porte, será adotado o valor de 8,0 kN/m³ para os resíduos compactados.

4.4 ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS

A região a ser atendida pelo aterro sanitário em questão possui 44,3 mil habitantes — 4.500 provenientes do distrito de Humaitá, 23.000 do bairro Benfca e 16.800 do bairro Santa Cruz (PJF, 2022). Dada a população atual a ser considerada no início do projeto, faz-se necessário saber como a população irá aumentar ao longo dos anos e qual será o montante final a ser

atendido pela obra do aterro. Para isso, pode-se utilizar taxas de crescimento, que podem ser obtidas por modelos aritméticos ou geométricos.

Para o presente estudo, a fim de se obter resultados mais conservadores e, baseados nas literaturas disponíveis, será utilizado o método geométrico ou exponencial. A equação que fornece a taxa exponencial de crescimento total (k_g) está descrita abaixo (SPINOLA, 2017).

$$k_g = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

Onde: P_2 é a população conhecida em um tempo t_2 ;

P_1 é a população conhecida em um tempo t_1 .

A Equação 2 apresentada abaixo deriva da Equação 1 e descreve o crescimento exponencial da população.

$$P_t = P_0 \times e^{k_g \times (t - t_0)} \quad (2)$$

Para o presente estudo foram utilizados os seguintes dados para o cálculo da taxa k_g :

- ❖ População de Juiz de Fora no ano de 2010: 516.247 habitantes (IBGE, 2022);
- ❖ População de Juiz de Fora no ano de 2021: 577.532 habitantes (IBGE, 2022).

A Tabela 5 apresenta um resumo dos dados utilizados e a taxa de crescimento obtida.

Tabela 5: Cálculo da taxa de crescimento geométrico populacional de Juiz de Fora

Taxa de Crescimento Geométrica		
População inicial conhecida	P1	516247
População final conhecida	P2	577532
Ano inicial conhecido	t1	2010
Ano final conhecido	t2	2021
Taxa de crescimento geométrica	kg	0,0102

Fonte: Autora (2022)

Dessa forma, obteve-se uma taxa de crescimento para o município de Juiz de Fora de 1,02%. A partir desse valor, é possível estimar a população a ser atendida pelo aterro sanitário até o momento de seu encerramento através da Equação 2. Para o aterro em estudo será utilizada a projeção de uma vida útil de 15 anos de operação — tempo mínimo recomendado pela NBR 15849 (2010).

Assim, partindo-se da população inicial de 44,3 mil habitantes presente no ano de 2021, e considerando o ano de 2023 como início da operação do aterro, obteve-se a projeção apresentada na Tabela 6 para os anos seguintes.

Tabela 6: Projeção da população para os próximos 15 anos

Ano		População
1	2023	45324,1
2	2024	45788,7
3	2025	46258,0
4	2026	46732,2
5	2027	47211,2
6	2028	47695,1
7	2029	48184,0
8	2030	48677,9
9	2031	49176,8
10	2032	49680,9
11	2033	50190,1
12	2034	50704,6
13	2035	51224,3
14	2036	51749,4
15	2037	52279,8

Fonte: Autora (2022)

Como citado anteriormente, o Brasil possui uma média de geração de resíduos de 1,07 kg/habitante/dia (ABRELPE, 2021). Além desse valor, será considerada taxa de crescimento estimada na produção de RSU de 0,01% ao ano. Outra consideração válida no cenário de dimensionamento é a taxa de coleta dos resíduos sólidos urbanos. De acordo com o Panorama anual disponibilizado pela ABRELPE (2021), na região Sudeste a taxa de coleta dos RSU foi de 98,2% — a maior taxa de coleta do Brasil.

A taxa de recobrimento dos resíduos, que pode ser entendida como a quantidade de material a ser utilizada na cobertura dos RSU, é estimada por alguns autores entre 20% (CTRVV, 2007) e 30% (SPINOLA, 2017). Para o presente estudo será adotada uma taxa de 30%.

Como mencionado no item 4.3.3 o peso específico adotado para os resíduos compactados é de 8,0 kN/m³. Um resumo de todos os dados utilizados para projeção da geração de resíduos está apresentado na tabela 7.

Tabela 7: Dados iniciais para projeção da geração de resíduos

Horizonte de planejamento	15 anos
População Inicial (2023)	45.324 habitantes
Taxa de crescimento geométrica da população	1,02%
Produção média de RSU por habitante	1,07 kg/dia
Taxa de crescimento na produção de RSU	0,01%
Taxa de cobertura de coleta de RSU	98,2%
Peso específico dos resíduos compactados	8,0 kN/m ³
Taxa de recobrimento dos resíduos	30%

Fonte: Autora (2022)

A projeção final com a estimativa de volume de operação acumulado no aterro ao fim de 15 anos está apresentada na Tabela 8.

Tabela 8: Projeção da geração de resíduos

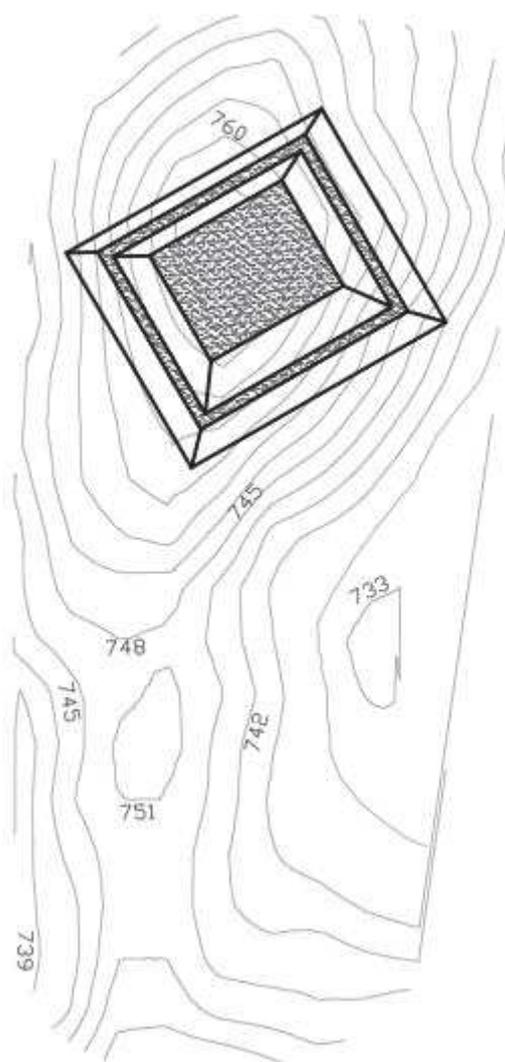
Ano	População	RSU			Solo	Total		
		Produção média de RSU por pessoa (kg/hab.d)	Quantidade gerada e coletada (t/d)	Volume compactado disposto no aterro (m ³ /ano)	Volume de solo de recobrimento (m ³ /ano)	Volume total de operação do aterro (m ³)	Volume de operação acumulado no aterro (m ³)	
1	2023	45324,1	1,0700	48,497	21728	6519	28247	28247
2	2024	45788,7	1,0701	48,999	21953	6586	28539	56786
3	2025	46258,0	1,0702	49,506	22181	6654	28835	85621
4	2026	46732,2	1,0703	50,018	22410	6723	29133	114754
5	2027	47211,2	1,0704	50,536	22642	6793	29435	144189
6	2028	47695,1	1,0705	51,059	22876	6863	29739	173928
7	2029	48184,0	1,0706	51,588	23113	6934	30047	203975
8	2030	48677,9	1,0707	52,122	23353	7006	30358	234334
9	2031	49176,8	1,0709	52,661	23594	7078	30673	265006
10	2032	49680,9	1,0710	53,206	23838	7152	30990	295996
11	2033	50190,1	1,0711	53,757	24085	7226	31311	327307
12	2034	50704,6	1,0712	54,314	24335	7300	31635	358942
13	2035	51224,3	1,0713	54,876	24586	7376	31962	390904
14	2036	51749,4	1,0714	55,444	24841	7452	32293	423197
15	2037	52279,8	1,0715	56,018	25098	7529	32627	455825

Fonte: Autora (2022)

4.5 GEOMETRIA FINAL

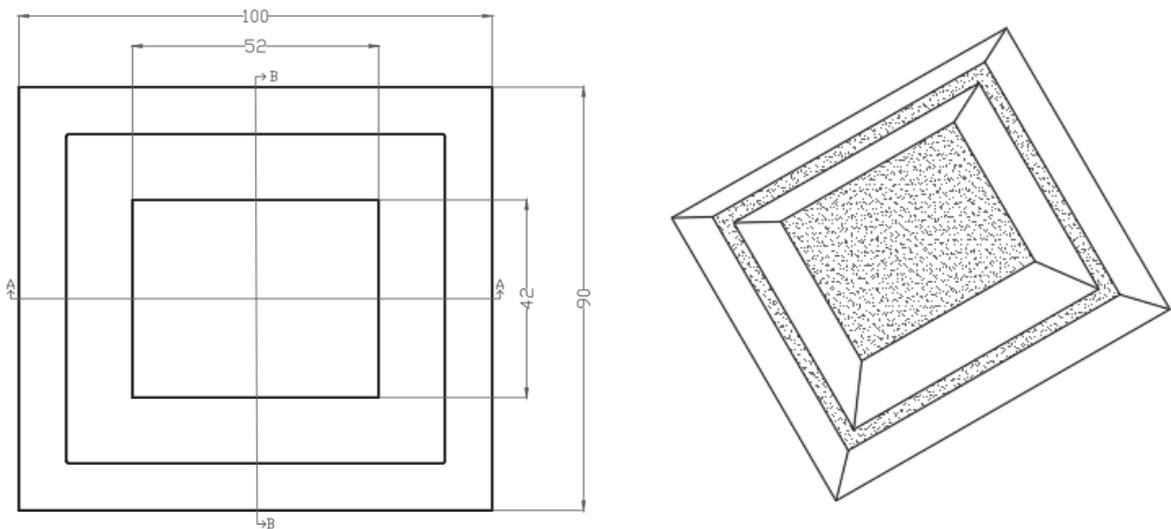
Tendo em vista a vida útil estimada para o aterro sanitário — 15 anos —, o volume final acumulado no aterro, as variáveis do local de implantação, incluindo os métodos de cobertura das células, definiu-se o aterro do tipo em área como o mais adequado. Para atender a demanda estimada, foi escolhida a geometria de uma base retangular de dimensões 100 x 90 m, com uma base menor no topo de 52 x 42 m, a ser implantada na cota 745. A altura final do aterro foi estimada em 10 metros, sendo dividida em dois taludes de 5 metros, declividade de 1(V):2(H) e distância entre bermas de 4 metros. A geometria escolhida comporta um volume de resíduos aproximado de 53.000 m³, atendendo o volume final estimado na Tabela 8. As figuras a seguir mostram uma vista superior da geometria final do aterro e seus cortes transversal e longitudinal.

Figura 13: Locação do aterro



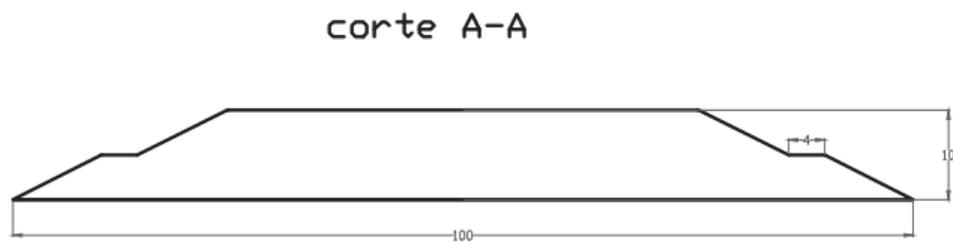
Fonte: Autora (2022)

Figura 14: Vista superior da geometria final do aterro sanitário (cotas em metros) e detalhe em perspectiva



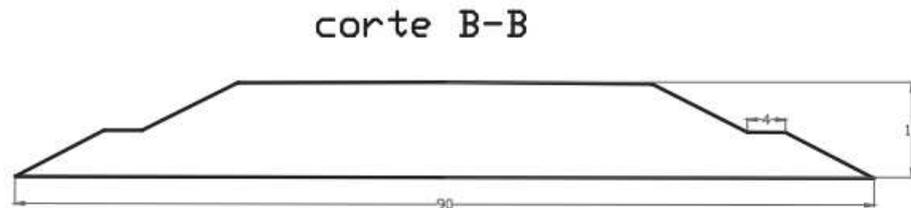
Fonte: Autora (2022)

Figura 15: Corte longitudinal da geometria final (cotas em metros)



Fonte: Autora (2022)

Figura 16: Corte transversal da geometria final (cotas em metros)



Fonte: Autora (2022)

4.6 IMPERMEABILIZAÇÃO DA BASE

A impermeabilização do fundo do aterro consiste em uma barreira protetora que impedirá os líquidos percolados de contaminarem o solo e as águas subterrâneas ali presentes. Desta forma,

é necessário que os materiais utilizados na construção dessa barreira apresentem propriedades — estanqueidade, durabilidade, resistência mecânica, resistência ao intemperismo — compatíveis com os resíduos a serem aterrados (CARVALHO, 1999).

Existem diversos tipos de materiais que podem ser empregados na construção dessas barreiras impermeabilizantes, destacando-se os solos naturais de argila compactada e as geomembranas (polietileno, PVC, asfáltica). A escolha do material a ser utilizado depende de fatores como o ambiente físico, a composição química do percolado e coeficiente de permeabilidade dos materiais (PIEADADE JÚNIOR, 2003).

Além disso, o revestimento do fundo pode ser realizado a partir de diversas combinações, sendo simples quando compostos por um único elemento de impermeabilização, e duplos ou compostos quando a barreira é executada alternando camadas de solo natural e geomembrana (CARVALHO, 1999).

Para fins de projeto, como a região estudada no presente trabalho apresenta coeficientes de permeabilidade muito variáveis e não satisfatórios, será realizado um revestimento no fundo do aterro. O método empregado baseia-se na fundação de aterros sanitários de São Paulo, onde utiliza-se uma camada de solo argiloso compactado com 0,60 m de espessura. A compactação desta camada é controlada através de ensaios, a fim de se obter um grau de compactação mínimo de 95% e teor de umidade dentro da faixa de $0 \pm 2\%$ da umidade ótima do proctor normal. Acima desta camada de solo, utiliza-se uma geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) de 2 mm de espessura, seguida de outra camada de solo argiloso de espessura mínima de 0,60 m, que tem como função recobrir e proteger a manta empregada (TIVERON et al., 1995 *apud* CARVALHO, 1999). O dimensionamento dos materiais a serem utilizados estão descritos abaixo.

a) Primeira camada de solo compactado:

A área de base do aterro a ser impermeabilizada possui dimensões de 100×90 metros, e a camada possui uma espessura de 0,6 metros. Dessa forma temos que:

$$V_{\text{solo compactado}} = 100 \times 90 \times 0,6$$

$$V_{\text{solo compactado}} = 5.400 \text{ m}^3$$

b) Geomembrana PEAD:

Com espessuras de 0,5 mm a 3 mm, a geomembrana de PEAD é produzida a partir de uma série de compostos que garantem alto desempenho de infiltração e de isolamento, apresentando índices de permeabilidade em torno de 10^{-12} cm/s. É produzido em forma de bobinas, com larguras em torno de 5 metros e comprimentos entre 50 e 300 metros (FELDKIRCHER, 2008).

A Figura 17 mostra a utilização de geomembranas de PEAD na etapa de impermeabilização da base de um aterro sanitário.

Figura 17: Impermeabilização com geomembrana de PEAD



Fonte: Feldkircher (2008)

Para fins de projeto, optou-se por geomembranas de 2 mm de espessura, fabricadas em bobinas de $5,90 \times 50$ metros (largura x comprimento). Além disso, na fase de dimensionamento serão considerados ancoragens de 50 cm e transpasses de 20 cm. O cálculo da quantidade de rolos de geomembrana necessária pode ser dado por:

- ❖ No comprimento de 100 metros — considerando uma ancoragem de 50 cm em cada lado, obtendo-se assim 101 metros de comprimento necessário:

$$N_1 = \frac{101}{50}$$

$$N_1 = 2,02 \text{ rolos}$$

- ❖ Na largura de 90 metros, considerando também ancoragens de 50 cm em cada lado:

$$N_2 = \frac{91}{5,90}$$

$$N_2 = 15,42 \text{ rolos}$$

❖ O cálculo de bobinas necessários para realizar o transpasse de 20 cm entre as faixas de geomembrana pode ser realizado da seguinte forma:

- No comprimento de 101 metros:

$$A_1 = (N_1 - 1) \times 0,2 \times \text{largura}$$

$$A_1 = (2,02 - 1) \times 0,2 \times 91$$

$$A_1 = 18,564 \text{ m}^2$$

- Na largura de 91 metros:

$$A_2 = (N_2 - 1) \times 0,2 \times \text{comprimento}$$

$$A_2 = (15,42 - 1) \times 0,2 \times 101$$

$$A_2 = 291,284 \text{ m}^2$$

- Área total de transpasse:

$$A_t = A_1 + A_2$$

$$A_t = 18,564 + 291,284$$

$$A_t = 309,8 \text{ m}^2$$

- Número de rolos:

$$N_t = \frac{A_t}{A_{rolo}}$$

$$N_t = \frac{309,8 \text{ m}^2}{5,90 \text{ m} \times 50 \text{ m}}$$

$$N_t = 1,05 \text{ rolos}$$

❖ Número total de rolos necessários:

$$N_{total} = N_1 + N_2 + N_t$$

$$N_{total} = 2,02 + 15,42 + 1,05$$

$$N_{total} = 18,49 \text{ rolos}$$

Desta forma, adotam-se 19 rolos de geomembrana para realizar a impermeabilização da base do aterro sanitário.

c) Camada superior de solo compactado:

De forma similar à primeira camada, temos:

$$V_{solo \text{ compactado}} = 100 \times 90 \times 0,6$$

$$V_{solo \text{ compactado}} = 5.400 \text{ m}^3$$

A Tabela 9 apresenta um resumo do quantitativo de materiais a serem utilizados na impermeabilização do fundo do aterro.

Tabela 9: Quantitativos de materiais a serem utilizados na impermeabilização da base

Quantitativo de Materiais		
Solo compactado (m³)		
Camada 1	Camada 2	Total
5.400	5.400	10.800
Geomembrana PEAD		
Número de rolos		Área total (m ²)
19		5605

Fonte: Autora (2022)

4.7 DRENAGEM SUPERFICIAL

Conforme apresentado no item 4.2.3, as águas pluviais possuem importância significativa na geração de chorume no interior do maciço. Desta forma, é imprescindível que seja previsto em projeto um sistema para drenagem das águas superficiais, com o objetivo de evitar a entrada de água no aterro, diminuindo o volume de lixiviado a ser produzido e reduzindo, assim, o risco de instabilidade na massa de resíduos. Além disso, o custo para armazenamento e tratamento

de chorume é significativo, evidenciando a importância de se ter um sistema de drenagem superficial eficiente.

Para o dimensionamento do sistema de drenagem superficial, é necessário obter o valor da vazão máxima de projeto. Um método bastante utilizado para obtenção deste valor é o método racional, que é descrito pela seguinte equação:

$$Q = 0,278 \times C \times i \times A \quad (3)$$

Onde: C é o coeficiente de escoamento superficial. Varia de 0 a 1 e é determinado através de tabelas;

i é a intensidade da chuva crítica (mm/h);

A é a área da bacia contribuinte (km²).

❖ Coeficiente de escoamento superficial

Estabelece uma relação entre as alturas efetiva e precipitada e depende de uma série de fatores, como tipo de solo, permeabilidade, ocupação da bacia, entre outros (GAROTTI e BARBASSA, 2010). De forma geral, este coeficiente é obtido através de tabelas, como a Tabela 10.

Tabela 10: Coeficientes de escoamento superficial (C)

Característica da Superfície		Coeficiente (C)
Ruas	Pavimentação asfáltica	0,70 a 0,95
	Pavimentação de concreto	0,80 a 0,95
Passeios		0,75 a 0,85
Telhados		0,75 a 0,95
Terrenos relvados (solos arenosos)	Pequena declividade (2%)	0,05 a 0,10
	Declividade média (2% a 7%)	0,10 a 0,15
	Forte declividade (7%)	0,15 a 0,20
Terrenos relvados (solos pesados)	Pequena declividade (2%)	0,15 a 0,20
	Declividade média (2% a 7%)	0,20 a 0,25
	Forte declividade (7%)	0,25 a 0,30

Fonte: Adaptado de CETESB (1980)

Para o presente estudo, considerando a predominância de solos argilosos e declividades maiores que 7%, será adotado um coeficiente de escoamento superficial de 0,28.

❖ Intensidade da chuva crítica

Pode ser determinada através da seguinte relação:

$$i = \frac{K \times T_r^a}{(t + b)^c} \quad (4)$$

Em que: T_r é o período de retorno (anos);

t é o tempo de duração da chuva (minutos);

K, a, b e c são parâmetros empíricos, que variam de acordo com a região.

Para a região de Juiz de Fora, os parâmetros empíricos (K, a, b e c) foram determinados através do *software* Plúvio 2.1. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 18.

Figura 18: Parâmetros obtidos através do *software* Plúvio 2.1

The screenshot displays the Plúvio 2.1 software interface. On the left, a map of Minas Gerais is shown with the state highlighted in blue. The map includes latitude and longitude coordinates: 43°21'00" and 21°46'00". On the right, the software settings are visible. The 'Estados' dropdown is set to 'Minas Gerais'. The 'Estações' list includes Ituiutaba, Itumirim, Jacinto, Janaúba, Janaúria, Jardim (Mateus Leme), João Pinheiro, Juatuba (Mateus Leme), Juiz de Fora (highlighted), and Juramento. The 'Localidades' list includes José Raydan, Joselândia (Santana dos Montes), Josenópolis, Juatuba, Jubai (Conquista), Juirapu (São Domingos do Prata), Juiz de Fora, Junco de Minas (Malacacheta), Juramento, and Juréia (Monte Belo). Below the lists, there is a button labeled 'FREITAS et al. (2001)'. At the bottom, there are buttons for 'Relatório', 'Ajuda', 'Cancelar', and 'Fechar'. A red box highlights the 'Parâmetros da Equação IDF' section, which contains the following values: K: 3000, a: 0,173, b: 23,965, and c: 0,96. At the bottom left, there are input fields for 'Latitude' and 'Longitude', both set to '00°00'00"', and a 'Calcular' button.

Fonte: Autora (2022)

Além disso, foram considerados:

- Tempo de retorno (T_r): De acordo com a IS-203 do DNIT (2006), para obras de drenagem superficial deve-se considerar períodos de recorrência entre 5 e 10 anos. No presente projeto, será considerado um T_r de 10 anos;

- Tempo de duração da chuva (t): De acordo com a IS-203 do DNIT (2006), para as obras de drenagem superficial deve-se adotar o tempo de concentração igual a 5 minutos.

Desta forma, temos:

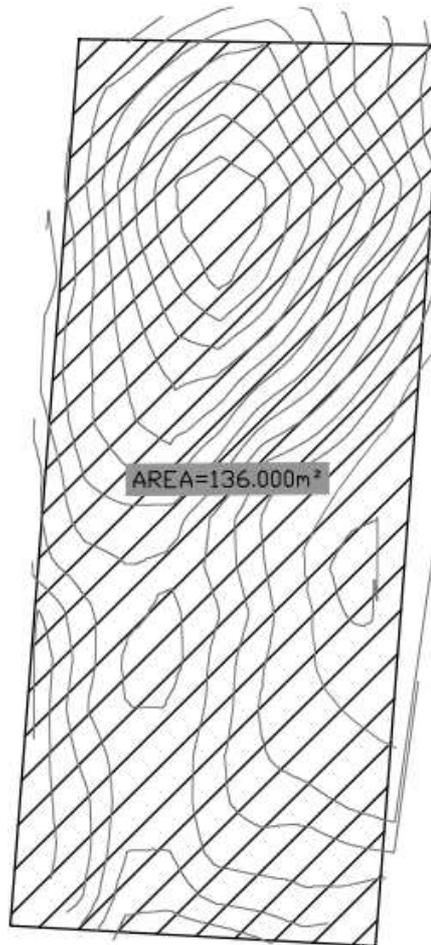
$$i = \frac{3000 \times 10^{0,173}}{(5 + 23,965)^{0,96}}$$

$$i = 176,49 \text{ mm/h}$$

❖ Área da bacia de contribuição

A área a ser considerada no dimensionamento será a área total de implantação do aterro, 136.000 m². Ela está representada na Figura 19.

Figura 19: Área da bacia de contribuição



Fonte: Autora (2022)

Desta forma, tem-se que:

$$Q = 0,278 \times C \times i \times A$$

$$Q = 0,278 \times 0,28 \times 176,49 \times 0,136$$

$$Q = 1,868 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para a captação das águas pluviais, optou-se por canaletas quadradas feitas de concreto. A declividade dos drenos foi adotada como 2%, e seu dimensionamento foi realizado através da equação estabelecida por Chézy e Manning, a saber:

$$Q = \frac{1}{n} \times A \times Rh^{2/3} \times I^{1/2} \quad (5)$$

Na qual: Q é a vazão de projeto, ou seja, a vazão a ser drenada (m^3/s);

n é o coeficiente de rugosidade;

A é a área da seção transversal molhada (m^2);

Rh é o raio hidráulico da seção ou perímetro molhado (m); e

I é a declividade do canal.

Considerando a seção do dreno preenchida em 80%, tem-se:

$$h = 0,8 \times b$$

$$A = b \times h = b \times (0,8 \times b) = 0,8 \times b^2$$

O cálculo do raio hidráulico é dado em função da área molhada (A) e do perímetro molhado da seção (P_m).

$$P_m = b + (2 \times h) \rightarrow \text{para seções retangulares} \quad (6)$$

$$P_m = b + (2 \times 0,8 \times b) = b + (1,6 \times b)$$

$$P_m = 2,6 \times b$$

$$Rh = \frac{A_m}{P_m} = \frac{0,8 \times b^2}{2,6 \times b}$$

$$Rh = 0,3077 \times b$$

Considerando que:

- ❖ O coeficiente de rugosidade (n) para o concreto é 0,015 (Figura 20, considerando tubos de concreto em condições regulares); e
- ❖ A declividade do canal será definida como 2%;

Figura 20: Coeficientes de Manning

Natureza das Paredes	Condições			
	Muito Boas	Boas	Regulares	Más
Tubos de ferro fundido sem revestimento.....	0,012	0,013	0,014	0,015
Idem, com revestimento de alcatrão.....	0,011	0,012*	0,013*	---
Tubos de ferro galvanizado.....	0,013	0,014	0,015	0,017
Tubos de bronze ou de vidro.....	0,009	0,010	0,011	0,013
Condutos de barro vitrificado, de esgotos.....	0,011	0,013*	0,015	0,017
Condutos de barro, de drenagem.....	0,011	0,012*	0,014*	0,017
Alvenaria de tijolos com argamassa de cimento: condutos de esgoto, de tijolos.....	0,012	0,013	0,015*	0,017
Superfícies de cimento alisado.....	0,010	0,011	0,012	0,013
Superfícies de argamassa de cimento.....	0,011	0,012	0,013*	0,015
Tubos de concreto.....	0,012	0,013	0,015	0,016
Condutos e aduelas de madeira.....	0,010	0,011	0,012	0,013
Calhas de prancha de madeira aplainada.....	0,010	0,012*	0,013	0,014
Idem, não aplainada.....	0,011	0,013*	0,014	0,015
Idem, com pranchões.....	0,012	0,015*	0,016	---
Canais com revestimento de concreto.....	0,012	0,014*	0,016	0,018
Alvenaria de pedra argamassa.....	0,017	0,020	0,025	0,030
Alvenaria de pedra seca.....	0,025	0,033	0,033	0,035
Alvenaria de pedra aparelhada.....	0,013	0,014	0,015	0,017
Calhas metálicas lisas (semicirculares).....	0,011	0,012	0,013	0,015
Idem, corrugadas.....	0,023	0,025	0,028	0,030
Canais de terra, retilíneos e uniformes.....	0,017	0,020	0,023	0,025
Canais abertos em rocha, lisos e uniformes.....	0,025	0,030	0,033*	0,035
Canais abertos em rocha, irregulares, ou de paredes de pedra irregulares e mal-arrumadas.	0,035	0,040	0,045	---
Canais dragados.....	0,025	0,028	0,030	0,033
Canais curvilíneos e lamosos.....	0,023	0,025*	0,028	0,030
Canais com leito pedregoso e vegetação aos taludes.....	0,025	0,030	0,035*	0,040
Canais com fundo de terra e taludes empedra- dos.....	0,028	0,030	0,033	0,035

Fonte: Porto (2006)

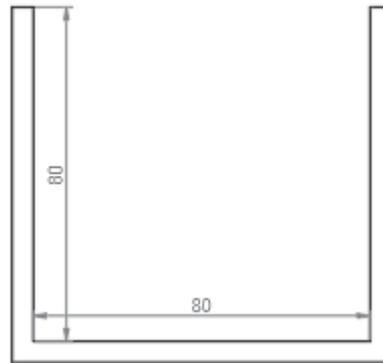
Fazendo as devidas substituições na Equação 5, obtém-se:

$$1,868 = \frac{1}{0,015} \times (0,8 \times b^2) \times (0,3077 \times b)^{2/3} \times (0,02)^{1/2}$$

$$b = 0,7955 \rightarrow b = 80 \text{ cm}$$

Desta forma, adotam-se drenos com uma seção transversal de dimensões 80 x 80 cm, conforme apresentado na Figura 21.

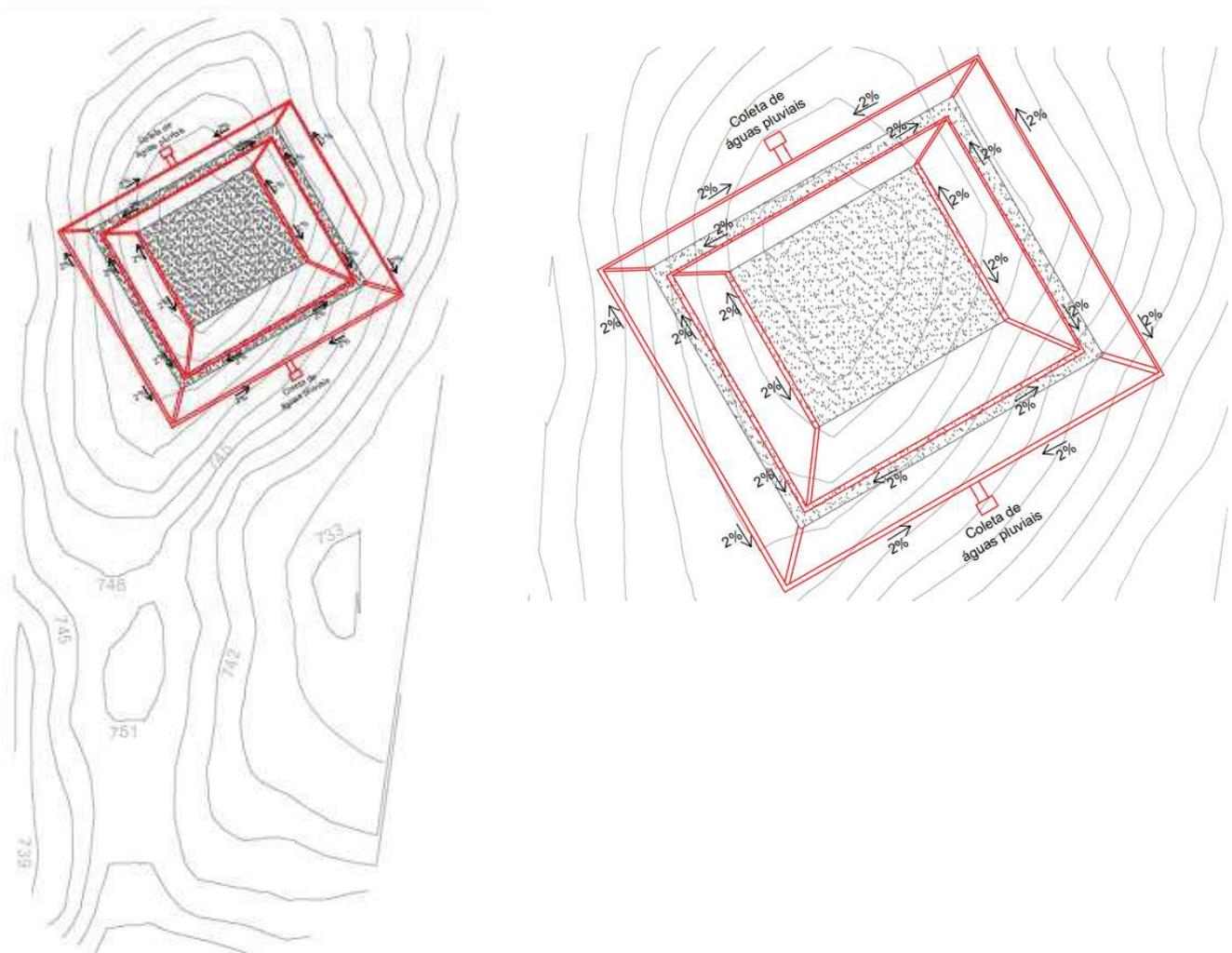
Figura 21: Seção transversal dos drenos de águas pluviais (cotas em centímetros)



Fonte: Autora (2022)

A disposição dos drenos no aterro está apresentada na Figura 22.

Figura 22: Disposição dos drenos de águas pluviais (drenos destacados em vermelho)



Fonte: Autora (2022)

4.8 DRENAGEM DE CHORUME

A fim de evitar a contaminação dos solos e das águas subterrâneas, e também reduzir as pressões internas nos maciços de resíduos, procede-se o dimensionamento de um sistema de drenagem de chorume. Esse sistema captará o lixiviado gerado pela decomposição do lixo e o conduzirá até as chamadas lagoas de chorume, a partir de onde o chorume será tratado e lançado na natureza.

4.8.1 ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE LIXIVIADOS

Para realização do dimensionamento do sistema de drenagem, o primeiro passo é estimar a quantidade de líquido percolado que será gerado no aterro. Esta estimativa pode ser realizada através de diferentes métodos, como o Método Suíço, o Método do Balanço Hídrico, o Método Racional e o Método da Capacidade de Campo (LINS, 2003).

Neste estudo de caso, utilizou-se o Método Suíço para estimativa da geração de percolados. De uma forma geral, este método correlaciona a precipitação, a área de contribuição do aterro e a geração de percolado e pode ser descrito pela seguinte equação:

$$Q = \frac{1}{t} \times (P \times A \times K) \quad (7)$$

Onde:

Q : vazão média de líquidos percolados (l/s);

P : precipitação anual (mm);

A : área do aterro (m²);

t : tempo em segundos (equivalente a 1 ano);

K : coeficiente de permeabilidade associado ao grau de compactação dos resíduos. Os valores são recomendados a partir da observação experimental e podem ser definidos através de tabelas como a apresentada a seguir.

Tabela 11: Valores de K para Aplicação do Método Suíço

Tipo de aterro	Peso específico dos resíduos no aterro	K
Aterros fracamente compactados	0,4 a 0,7 ton/m ³	0,25 a 0,50
Aterros fortemente compactados	Acima de 0,7 ton/m ³	0,15 a 0,25

Fonte: Rocca (1981), apud Lins (2003)

Como citado no item, o peso específico estimado para os resíduos compactados foi de 8,0 kN/m³ (ou 0,8 ton/m³). Assim, definiu-se o valor de 0,20 para o coeficiente K.

Desta maneira, obtém-se:

$$Q = \frac{1}{31536000} \times (1644 \times 9000 \times 0,20)$$

$$Q = 0,094 \text{ l/s}$$

4.8.2 SISTEMA DE DRENAGEM

De forma geral, esse sistema pode ser composto por drenos de material filtrante com tubo perfurado. É importante ressaltar que o sistema de drenagem deverá ser construído em todos os patamares de resíduos, e os materiais utilizados devem ser inertes ao lixiviado (VILHENA, 2018).

No presente estudo, o sistema de drenagem de percolado será realizado através da execução de drenos no terreno no formato de espinha de peixe a serem preenchidos por brita n° 2, e instalados com uma declividade de 2%, conforme ilustra a Figura 23.

Figura 23: Modelo de sistema de drenagem



Fonte: Sustentare Saneamento (2017)

O cálculo das seções dos drenos de lixiviado podem ser realizados através da Lei de Darcy:

$$Q = K \times i \times A \quad (8)$$

Onde:

Q : vazão de projeto para a seção do dreno de lixiviado considerada (m^3/s);

K : condutividade hidráulica (m/s). Os valores de K são tabelados para os diferentes tipos de material (ver Tabela 12);

i : gradiente hidráulico (ou declividade);

A : área da seção transversal do dreno (m^2).

Tabela 12: Condutividade hidráulica

Tipo de material	Granulometria	K (m/s)
Brita 5	75 - 150 mm	1,0
Brita 4	50 - 75 mm	0,8
Brita 3	38 - 50 mm	0,45
Brita 2	25 - 38 mm	0,25
Brita 1	19 - 25 mm	0,15
Brita 0	9,5 - 19 mm	0,05
Areia Grossa	4,8 - 6,3 mm	10^{-3}

Fonte: Adaptado de DNIT (2006)

Deste modo, fazendo as substituições necessárias na Equação 8, tem-se:

$$9,4 \times 10^{-5} = 0,25 \times 0,02 \times A$$

$$A = 0,02 \text{ m}^2$$

Adotando-se drenos de seção circular:

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4} \quad (9)$$

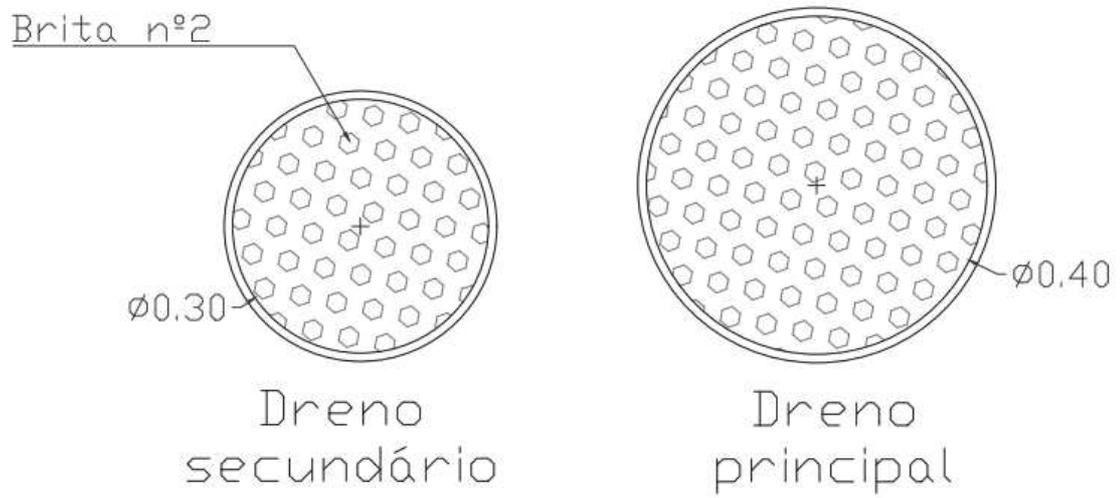
$$0,02 = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

$$D = 0,16 \text{ m} = 16 \text{ cm}$$

Logo, o diâmetro mínimo para atender a vazão de lixiviado é de 16 cm. Para fins de projeto e execução, será adotado um diâmetro de 30 cm para os drenos do sistema de drenagem de chorume, por este valor corresponder à largura mínima das conchas de escavação de retroescavadeiras. O sistema será composto por duas redes de drenagem, cada uma com quatro drenos secundários ($D = 30 \text{ cm}$), ligados ao dreno principal (adotado $D = 40 \text{ cm}$). A princípio, o sistema foi superdimensionado tendo em vista as incertezas envolvidas nos cálculos e projeções.

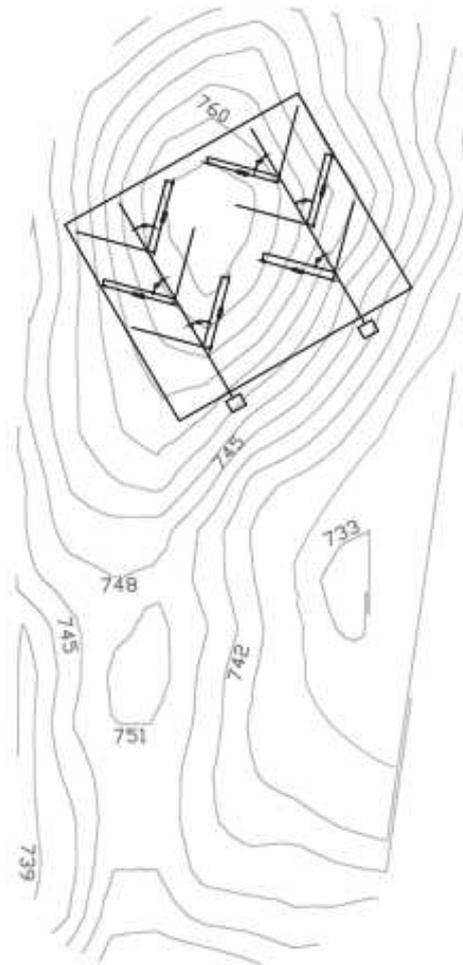
As Figuras 24, 25 e 26 apresentam a disposição dos drenos no aterro e suas seções transversais.

Figura 24: Seções transversais — dreno secundário e dreno principal



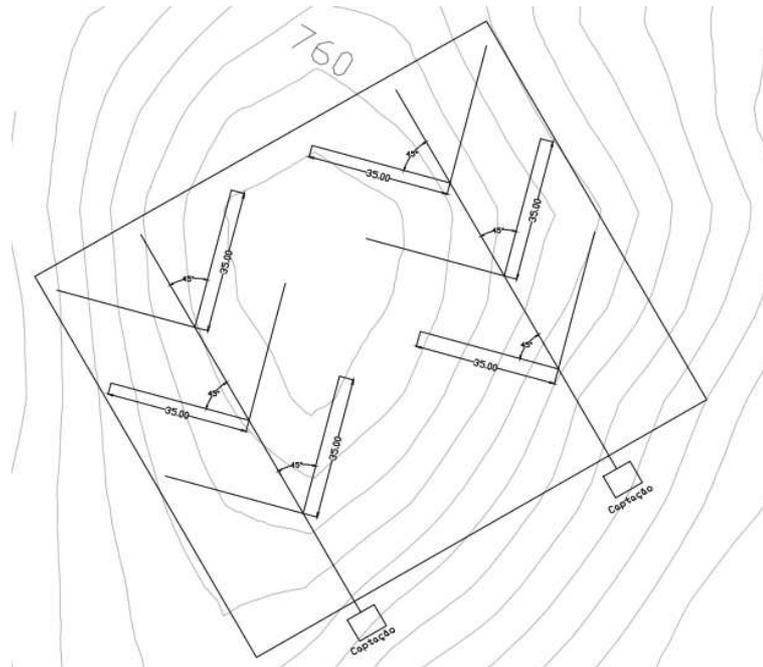
Fonte: Autora (2022)

Figura 25: Localização do sistema de drenagem de chorume



Fonte: Autora (2022)

Figura 26: Sistema de drenagem de lixiviado



Fonte: Autora (2022)

4.9 DRENAGEM DE GÁS

Tem como função principal drenar os gases provenientes da decomposição da matéria orgânica — principalmente metano e dióxido de carbono —, evitando assim sua percolação através do maciço e possíveis acidentes (VILHENA, 2018). A Figura 27 apresenta um modelo de dreno de gás.

Figura 27: Dreno de biogás



Fonte: Vilhena (2018)

Geralmente, estes drenos são interligados ao sistema de drenagem de percolado e, juntamente aos drenos verticais, podem ser associados drenos horizontais secundários a fim de facilitar o processo de drenagem (VILHENA, 2018). A Figura 28 ilustra um dreno de gás (com drenos horizontais) ligado ao sistema de drenagem de chorume.

Figura 28: Sistema de drenagem de gás interligado à drenagem de lixiviado



Fonte: SOUSA (2017)

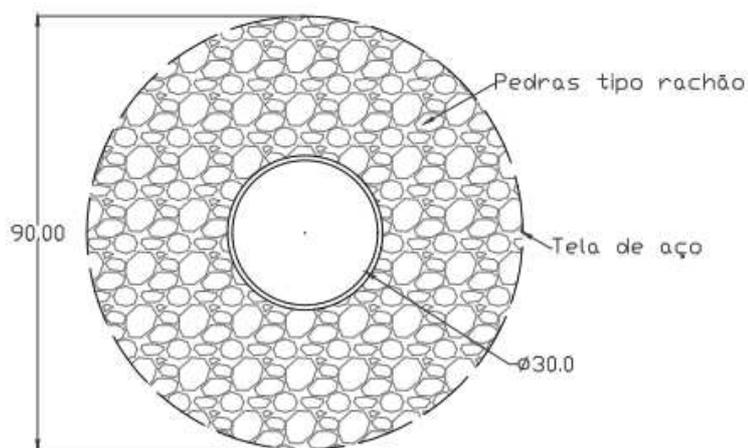
Os drenos de biogás normalmente são constituídos por tubos de concreto perfurados e envoltos por uma camada de brita ou rachão, que deve apresentar espessura igual ao diâmetro do tubo utilizado para drenagem dos gases. À medida que o aterro ganha altura, os drenos são estendidos verticalmente, até atingir a cota final do maciço; e em seu topo é recomendável a instalação de um *flare* para que o gás seja queimado à medida em que é liberado (BARIRI, 2018).

O dimensionamento do sistema de drenagem de biogás depende da geração e da vazão a ser drenada. No entanto, como ainda não existem modelos de cálculo comprovados, é comum que esse dimensionamento seja realizado de forma empírica (VILHENA, 2018). No presente trabalho, o dimensionamento apresentado abaixo foi realizado baseado em projetos de aterros brasileiros.

Serão adotados tubos de concreto perfurados com 30 cm de diâmetro, envoltos por uma camada também de 30 cm de pedras tipo rachão. Para a contenção destas pedras, será instalada uma tela de aço do tipo Q138 ou similar (SILVA, 2016). A NBR 15849 (2010) impõe uma limitação máxima para a distância entre os drenos de 30 metros. Assim, de forma a atender a norma vigente, será adotado um espaçamento de 20 metros entre os drenos.

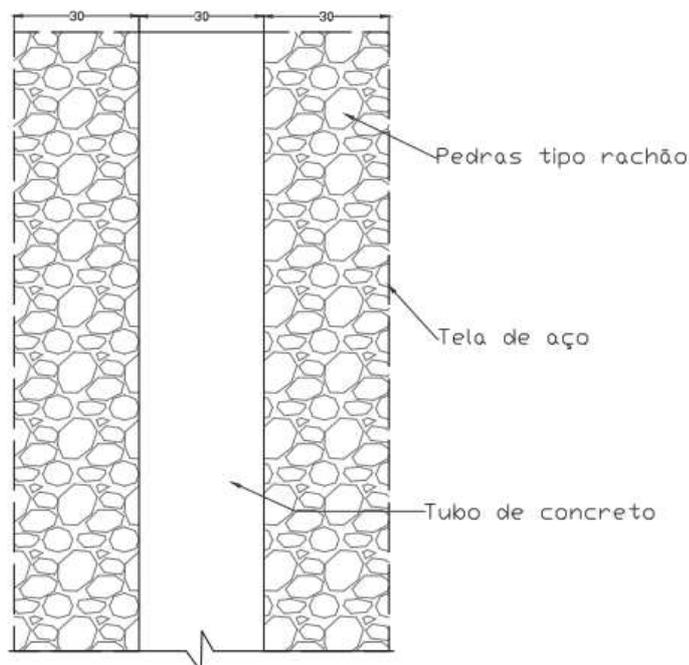
O detalhamento dos drenos de gás está apresentado a seguir.

Figura 29: Seção transversal do dreno de gás (dimensões em cm)



Fonte: Autora (2022)

Figura 30: Seção longitudinal dos drenos de gás



Fonte: Autora (2022)

4.10 COBERTURA

As camadas de cobertura têm como principais objetivos: controlar a entrada de água e ar no maciço, minimizar a saída de gás, reduzir odores e a proliferação de vetores de doenças e permitir a recomposição da paisagem (CATAPRETA, 2008). De forma geral, elas podem ser divididas em três tipos, cobertura diária, intermediária e final.

A camada de cobertura diária ou intermitente consiste na cobertura dos resíduos ao final de cada jornada de trabalho. Usualmente, utiliza-se uma camada de 20 cm de solo que tem como principais funções evitar o espalhamento dos materiais mais leves, como papel e plástico, e evitar a presença de vetores (VILHENA, 2018).

A cobertura intermediária é utilizada nos locais em que a superfície de disposição ficará inativa por períodos mais prolongados (± 1 mês), aguardando, por exemplo, a conclusão de um patamar para início do seguinte (VILHENA, 2018).

A camada de cobertura final deve minimizar a entrada de água no aterro a fim de reduzir o volume de chorume a ser gerado; e controlar a saída de gases para a atmosfera. Desta forma, os

materiais utilizados devem ser impermeáveis, resistentes a processos erosivos e apresentar características que permitam o plantio de vegetação (ALVES; BELTRÃO; JUCÁ, 2008).

A NBR 13896 (1997) também estabelece alguns requisitos que o sistema de cobertura final que será implantado no aterro deve atender, a saber:

- ❖ Minimizar a infiltração de água nas células;
- ❖ Demandar pouca manutenção;
- ❖ Promover a drenagem;
- ❖ Não estar sujeito a erosão;
- ❖ Acomodar recalques sem fissurar;
- ❖ Possuir um coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da área do aterro.

4.10.1 COBERTURA DIÁRIA

Seguindo as recomendações normativas e de estudiosos do assunto, após o lançamento e compactação dos resíduos diários deverá ser disposta uma camada de 20 cm de solo para evitar o espalhamento dos resíduos e a proliferação de vetores, como animais e insetos. É válido ressaltar que essa camada não necessita de compactação e deve ser retirada, podendo ser reaproveitada, à medida em que uma célula de resíduos avance sobre a existente.

4.10.2 COBERTURA FINAL

Será adotada uma camada de solo argiloso de 60 cm que deverá ser compactada até atingir uma permeabilidade inferior a 1×10^{-5} cm/s. Acima desta camada, deverá ser prevista uma camada vegetal, favorecendo um maior escoamento superficial e protegendo a camada de argila da erosão. É sugerido o plantio de gramíneas de raízes radiais; devendo ser evitado o plantio ou o crescimento natural de espécies com raízes pivotantes e profundas como ipê, aroeira, etc. (ALVES; BELTRÃO; JUCÁ, 2008).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os RSU são gerados em grande quantidade em nossa sociedade e a falta de gerenciamento destes resíduos pode acarretar sérios problemas. Os aterros sanitários representam uma maneira ambientalmente correta de destinação para os resíduos, uma vez que prezam pela proteção do solo e das águas subterrâneas, além de reduzir a emissão de gases poluentes e prevenir a proliferação de vetores.

O presente trabalho teve como objetivo geral compilar as principais diretrizes para projetos e dimensionamento de um aterro sanitário. A partir disso, foi realizada uma pesquisa científica com o objetivo de selecionar e analisar os principais métodos de dimensionamento utilizados nesta obra de Engenharia.

Tendo como base a pesquisa bibliográfica realizada e consultas a projetos existentes, foi possível realizar o dimensionamento de um aterro sanitário fictício para o município de Juiz de Fora. Tal dimensionamento levou em consideração alguns dos elementos de projeto de um aterro: impermeabilização da base, drenagem de águas pluviais, chorume e gás, e camadas de cobertura.

Para iniciar o dimensionamento do aterro, levou-se em consideração uma estimativa da geração de resíduos nos próximos 15 anos, através de métodos de projeção geométricos. A partir desta estimativa, foi possível propor uma geometria para o aterro, e, logo em seguida, dimensionar sua camada de impermeabilização. O sistema de impermeabilização proposto utiliza camadas de argila compactada e uma geomembrana PEAD de 2 mm de espessura.

Para o sistema de drenagem superficial foram propostas canaletas quadradas feitas de concreto de dimensões 80 x 80 cm, que serão instaladas com declividade de 2% no entorno do aterro, de forma a conduzir as águas pluviais a pontos de coleta.

Para a drenagem de chorume, utilizou-se o Método Suíço para estimativa da geração de percolato. A partir deste cálculo, foram indicados drenos de 30 e 40 cm de diâmetro que serão instalados seguindo o formato “espinha de peixe”.

O sistema de drenagem de gás foi dimensionado de forma empírica e optou-se pela utilização de tubos perfurados de concreto de 30 cm de diâmetro envoltos por pedras tipo rachão.

Para as camadas de cobertura, foram propostos sistemas de cobertura diária e final. Para cobertura diária será utilizada uma camada de 20 cm de solo que poderá ser reutilizado a cada jornada de trabalho. Já para a cobertura final, foi indicada uma camada de 60 cm de solo argiloso que deverá ser protegido por uma camada vegetal.

Vale destacar que muitas informações utilizadas no desenvolvimento do projeto foram obtidas por *softwares* ou plataformas oficiais do município. Entretanto, por questões de viabilidade, alguns dados foram estimados com base em referências da literatura ou em projetos já realizados.

É importante ressaltar que os aterros sanitários ainda são considerados obras recentes no Brasil, e por isso, ainda não existe um consenso acerca dos melhores métodos para projetos e dimensionamento. Atualmente, o tema vem sendo mais discutido e tem ganhado maior relevância, o que faz com que novas informações surjam a todo momento, tornando indispensáveis novos estudos e pesquisas.

Por fim, o presente trabalho se encerra com o objetivo de contribuir com qualquer pessoa que se interesse pela área de Geotecnia Ambiental ou Aterros Sanitários, podendo ser utilizada principalmente no meio acadêmico como um manual para desenvolvimento de projetos de aterros, em disciplinas que tratem sobre o tema.

REFERÊNCIAS

- ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021**. São Paulo, 2021. 54 p.
- ALVES, M. C. M.; BELTRÃO, K. G. Q. B.; JUCÁ, J. F. T. **Resíduos Sólidos: Projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários: Guia do profissional em treinamento: Nível 2**. Salvador, ReCESA, 2008.
- ANDRADE, F. L. **Movimento de Blocos Rochosos: Um Estudo Acerca do Risco e Sua Percepção no Morro do Cristo em Juiz de Fora – MG**. 2015. 132 p. Dissertação (Mestrado em Geografia). Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419**: apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992. 7 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10157**: aterros de resíduos perigosos - Critérios para projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 1987. 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13896**: aterros de resíduos não perigosos – critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997. 12 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15113**: resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004. 12 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15849**: resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Rio de Janeiro, 2010. 24 p.
- BARIRI (SP). Prefeitura Municipal. **Memorial descritivo e de cálculo do Aterro Sanitário de Bariri – SP**. Rev. 01. Bariri, SP, fev. 2018. Disponível em:

<https://www.bariri.sp.gov.br/editais/memorial_descritivo_01031031.pdf>. Acesso em: nov. 2022.

BARROS, R. M. **Tratado sobre Resíduos Sólidos: Gestão, Uso e Sustentabilidade**. 1 ed. Rio de Janeiro: Ed. Interciência; Minas Gerais: Ed. Acta, 2012, 374 p.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). **Diretrizes básicas para estudos e projetos rodoviários: escopos básicos / instruções de serviço**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2016, 484 p.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008, 248 p.

CARVALHO, M. F. **Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos**. 1999. 300 p. Tese (Doutorado em Geotecnia). São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.

CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da Influência do Projeto, Construção e Operação**. 2008. 316 p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Drenagem Urbana: Manual de Projeto**. 2ª edição corrigida. São Paulo: DAEE / CETESB, 1980, 468 p.

Costa, V. A. **Consórcios públicos para gestão de resíduos sólidos urbanos: análise do processo de estruturação e implantação no Estado do Rio de Janeiro**. 2016. 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2016.

FELDKIRCHER, W. **Impermeabilização de aterro sanitário com geomembrana**. 2008. 62 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Itatiba: Universidade de São Francisco, 2008.

GAROTTI, L. M.; BARBASSA, A. P. **Estimativa de área impermeabilizada diretamente conectada e sua utilização como coeficiente de escoamento superficial**. Engenharia Sanitária e Ambiental, São Carlos, SP, v.15, n.1, p.19-28, jan/mar 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Panorama do município de Juiz de Fora - Censo 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/juiz-de-fora/panorama>>. Acesso em: set. 2022.

JUIZ DE FORA (MG). **Prefeitura Municipal**. Disponível em: <<https://pjf.mg.gov.br/>>. Acesso em: ago. 2022.

LINS, E. A. M. **A Utilização da Capacidade de Campo na Estimativa o Percolado Gerado no Aterro da Muribeca**. 2003. 125 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil). Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2003.

LIXÃO, aterro controlado e aterro sanitário. **Ecoarquitetura**, 2010. Disponível em: <<https://ecoarquitetura.wordpress.com/2010/05/14/lixao-aterro-controlado-e-aterro-sanitario/>>. Acesso em: set. 2022.

MARQUES, A. C. M. **Compactação e Compressibilidade de Resíduos Sólidos Urbanos**. Tese (Doutorado em Geotecnia) v.1 e 2. São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2001, 469 p.

MENEZES, R. O. et al. **Análise estatística da caracterização gravimétrica de resíduos sólidos domiciliares: estudo de caso do município de Juiz de Fora, Minas Gerais**. Engenharia Sanitária e Ambiental (online), v.24, n.2, p. 271-282, mar/abr 2019.

NASCIMENTO, J. C. F. **Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2007. 154 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

NASCIMENTO, M. C. B. **Seleção de Sítios Visando a Implantação de Aterros Sanitários com Base em Critérios Geológicos, Geomorfológicos E Hidrológicos**. 2001. 137 p. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Universidade de São Paulo, 2001.

PAES, R. F. C. **Caracterização do Chorume Produzido no Aterro da Muribeca – PE**. 2003. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Campina Grande: Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, 2003.

Pesquisadores do FADE/BNDES. **Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão.** Projeto de Pesquisa Científica. Pernambuco, 2014, 183 p.

PIEIDADE JUNIOR, C. R. C. **Análise da Potencialidade de Alguns Solos Não Lateríticos para Utilização em Barreiras Impermeáveis.** 2003. 115 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica.** 4ª ed. São Carlos: EESC - USP, 2006.

QUEIROZ, P. C. D. **O Plano Do Gerenciamento do Resíduo Sólido Urbano como Ferramenta de Implantação do Programa Lixo Zero em Araguari – MG.** 2010. 356 p. Tese (Doutorado em Geografia). Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2010.

RIGHI, J. A. **Proposta de índice de avaliação de aterros de resíduos desativados a partir do potencial poluidor do lixiviado.** 2017. 190 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Rio de Janeiro: COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

RODRIGUES, S. Maior lixão do país foi fechado depois de 60 anos de atividades. **O Eco**, 2018. Disponível em: <<https://oeco.org.br/noticias/maior-lixao-do-pais-foi-fechado-depois-de-60-anos-de-atividades/>>. Acesso em: out. 2022.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico.** [S.l: s.n.], 2016. 106p.

SILVA, K. T. **Projeto de um Aterro Sanitário de Pequeno Porte.** 2016. 66 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

SOUSA, F. O Alto Custo das Terras para a Implantação dos Aterros Sanitários. **Água, Vida & Cia**, 2017. Disponível em: <<https://ferdinandodesousa.com/2017/03/20/o-alto-custo-das-terras-para-a-implantacao-dos-aterros-sanitarios/>>. Acesso em: dez. 2022.

SOUZA, V. O. A. **Simulação de Fluxo Vertical em Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos.** 2011. 176 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Rio de Janeiro: COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

SPINOLA, G. M. R. **Caracterização e Dimensionamento de Aterros Sanitários para Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil e nos Municípios Paulistas.** Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica. 2017. INPE: São José dos Campos, SP, 2017.

VILHENA, A. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**. 4 ed. São Paulo: CEMPRE, 2018, 316 p.

ZANTA, V. M.; FERREIRA, C. F. A. Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos Urbanos. In: CASTILHOS JR., J. A. **Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para municípios de Pequeno Porte**. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. p 01-18.