



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS CRATEÚS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

MONALISA ELIAS DE FRANÇA

**METODOLOGIA PARA PROJETO BÁSICO DE UM ATERRO SANITÁRIO PARA
MUNICÍPIO DE MÉDIO PORTE**

CRATEÚS

2023

MONALISA ELIAS DE FRANÇA

**METODOLOGIA PARA PROJETO BÁSICO DE UM ATERRO SANITÁRIO PARA
MUNICÍPIO DE MÉDIO PORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título do grau de bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientadora: Profa. Dr^a. Janine Brandão de Farias Mesquita.

Coorientadora: Profa. Dr^a. Carla Beatriz Costa de Araújo.

CRATEÚS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F882m França, Monalisa Elias de.
Metodologia para projeto básico de um aterro sanitário para município de médio porte / Monalisa
Elias de França. – 2023.
70 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús,
Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Crateús, 2023.
Orientação: Profa. Dra. Janine Brandão de Farias Mesquita.
Coorientação: Profa. Dra. Carla Beatriz Costa de Araújo.

1. Aterro Sanitário. 2. Resíduo Sólido Urbano (RSU). 3. Disposição Final. 4. Dimensionamento. I. Título.
CDD 628

MONALISA ELIAS DE FRANÇA

**METODOLOGIA PARA PROJETO BÁSICO DE UM ATERRO SANITÁRIO PARA
MUNICÍPIO DE MÉDIO PORTE**

Projeto de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título do grau de bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr^a. Janine Brandão de Farias Mesquita (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr^a. Carla Beatriz Costa de Araújo (Coorientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr^a. Raimunda Moreira da Franca
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

A minha mãe, Chiquinha, minha irmã, Joice, e
a toda a minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a minha família, por ser meu alicerce e a fonte da minha força, por não me deixar desistir. Minha mãe, Chiquinha, minha irmã, Joice, aos meus tios, Tereza, João Antônio, Leda, Maria e tantos outros. As minhas primas-irmãs, Jully, Maria Rita, Laura, Luana. E a pessoa que me criou e esteve presente em todos os momentos da minha vida, e acredito que esteja olhando por mim, minha avó, Joaquina.

Aos meus amigos de universidade, por serem os maiores parceiros que eu poderia desejar, por me inspirar diariamente e me orgulhar por cada conquista. Ao Alisson Torquato, Heliana Coelho, Igor Evangelista, Karina Albuquerque, Marcela Vericimo, Caio Rosa, Thamires Ximenes, Moacir Bezerra e tantos outros.

Aos meus amigos da vida, que me apoiam e acreditam no meu potencial mesmo sem entender o que eu faço. A Crislayne Vieira, Daniele Macêdo, Dandara Moura, Leticia Torres, João Neto, Thais Ananda, Vanessa Mota, Natalia Alfaia, e a todos que sempre torcem por mim e estiveram presente em algum momento da minha jornada.

Á Prof. Dr. Janine Brandão de Farias Mesquita e á Prof. Dr. Carla Beatriz Costa de Araújo pela excelente orientação, compreensão e tempo concedido, mas principalmente por não terem desistido de mim. A Prof. Dr. Raimunda Moreira da Franca por participar da banca e por toda a orientação durante minha graduação. E a todos os meus professores da universidade por todo o conhecimento passado, conselhos e apoio que tanto precisei. Aos Prof. Dr. Luana Vianna Costa e Silva, Alan Michell Barros Alexandre por me acompanharem tão sabiamente nessa jornada.

RESUMO

A disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU) em locais inadequados, como nos lixões e aterros controlados, causam uma série de danos ao meio ambiente e seu entorno. O atual sistema de disposição de resíduos da cidade de Canindé – CE não compreende aterro sanitário ou um sistema adequado para disposição de seus resíduos. Com a finalidade de minimizar os danos sociais, econômicos e ambientais causados pela disposição incorreta dos resíduos sólidos, estando em conformidade com a Lei 12.305/2010 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), este trabalho estabeleceu um projeto básico de aterro sanitário para implantação no município de Canindé. Ao longo do trabalho foram especificados os principais aspectos para o desenvolvimento do aterro sanitário como: identificação de áreas favoráveis à implantação, construção, operação, dimensionamento e estabilidade dos taludes. O aterro foi dimensionado com a capacidade de confinar cerca de 440 mil m³ de resíduos compactados e cobertos e alocados em duas células totais cujas maiores dimensões são 480m x 240m x 2,3 m. Possui o sistema de drenagem espinha de peixe acoplado a uma lagoa de acondicionamento do lixiviado capaz de guardar o efluente por 7 dias até o seu tratamento e sua disposição final. Foram simuladas, através do programa computacional Slide 6.0 da Rocscience, quatro condições em que a estabilidade geomecânica do maciço de resíduos e dos taludes do aterro irão ser submetidos ao longo do seu funcionamento e após o seu encerramento. Todas as situações apresentaram coeficiente de fator de segurança acima do considerado mínimo para a ruptura do talude, ou seja, com chances mínimas possíveis falhas na estrutura. O trabalho propôs ainda um plano de monitoramento técnico básico para os 20 anos de funcionamento e previsão de atividades pós encerramento do tempo útil do aterro sanitário. Assim, de acordo com o objetivo disposto na PNRS, a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, o presente trabalho traz uma proposta de um aterro sanitário dimensionado de acordo com as normas regulamentadoras em vigência, a NBR 13896/97, NBR 8419/92, e NBR 15879/2010, aplicadas a um município de médio porte, com população inferior a 100 mil habitantes, uma solução para a disposição dos rejeitos com mínimas chances de causar impactos ambientais e que ainda abrindo espaço para o aproveitamento de gases e tratamento de lixiviado, ou seja, com emissões mínimas ao meio ambiente.

Palavras-chave: Aterro Sanitário; Resíduo Sólido Urbano (RSU); Disposição Final; Dimensionamento.

ABSTRACT

The final disposal of urban solid waste (USW) in inappropriate locations, such as in controlled landfills and landfill, causes a number of damage to the environment and surroundings. The current waste disposal system of the city of Canindé – CE does not include sanitary landfill or an adequate system for disposal of its waste. In order to minimize the social, economic and environmental damage caused by the incorrect disposal of solid waste, being in accordance with Law 12.305/2010 establishing the National Solid Waste Policy (NSWP), this research established a basic landfill project for implementation in the municipality of Canindé. Throughout this study, the main aspects for the development of sanitary landfill were specified such as: recognition of favorable areas for deployment, construction, operation, dimensioning and stability of the landfills. The landfill was dimensioned with the capacity to contain about 440 thousand m³ of compacted and covered waste and allocated into two total cells whose largest dimensions are 480m x 240m x 2,3 m. It has the fish spine drainage system coupled to a packing lagoon of the effluent capable of storing the effluent for 7 days until its treatment and final disposal. Through Rocscience's Slide 6.0 computer program, four conditions were simulated under which the geomechanical stability of the waste mass and the landfills of the landfill will be subjected throughout its operation and after its closure. All situations presented a safety factor coefficient above the considered minimum for the rupture of the fence, i.e. with minimal chances of possible failures in the structure. The work also proposed a basic technical monitoring plan for the 20 years of operation and forecast of activities after the closure of the wastewater disposal time. Throughout, in accordance with the objective laid down in the NSWP, the environmentally adequate final disposal of waste, this research brings a proposal for a sanitary landfill dimensioned according to the regulatory standards in force, the NBR 13896/97, NBR 8419/92, and NBR 15879/2010, applied to a medium-sized municipality, with a population of less than 100 thousand inhabitants, a solution for disposing of waste with minimal chances of causing environmental impacts and that still opening up space for the utilization of gases and treatment of effluent, that is, with minimum emissions to the environment.

Keywords: Landfill; Solid Urban Waste (SUW); Final disposal; Dimensioning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferentes configurações dos drenos espinha de peixe.....	24
Figura 2 – Localização de Canindé.....	29
Figura 3 – Mapa Geológico do Ceará.....	32
Figura 4 – Curvas de Nível de Canindé.....	33
Figura 5 – Mapa com as Bacias Hidrográficas do Ceará.....	34
Figura 6 – Mapas das Bacias Hidrográficas de Canindé	35
Figura 7 – Modelo da célula padrão.....	39
Figura 8 – Posicionamento das células padrão.....	39
Figura 9 – Local proposto para o Aterro Sanitário de Canindé.....	45
Figura 10 – Sequência de construção das células padrão do Aterro Sanitário.....	48
Figura 11 – Vista superior das Células Totais.....	49
Figura 12 – Vista longitudinal das Células Totais no corte A-A.....	50
Figura 13 – Corte B-B com a vista Transversal das Células Totais.....	50
Figura 14 – Revestimento de Fundo do Aterro Sanitário.....	50
Figura 15 – Corte A-A com descrição das camadas do revestimento de fundo.....	51
Figura 16 – Corte A-A com detalhes do revestimento de fundo.	51
Figura 17 – Corte com a ancoragem da geomembrana.	51
Figura 18 – Seção Transversal do Dreno Cego Retangular.....	53
Figura 19 – Sistema de Drenagem de lixiviados.....	54
Figura 20 – Lagoa de lixiviados.....	55
Figura 21 – Cobertura Final do Aterro Sanitário.....	55
Figura 22 – Dreno de gás.....	56
Figura 23 – Sistema de Drenagem de Gases.....	57
Figura 24 – Colchão Reno.....	57
Figura 25 – Canaleta de concreto.....	58
Figura 26 – Análise de estabilidade do terreno.....	58
Figura 27 – Pontos de Monitoramento dos Lixiviados.....	59
Figura 28 – Pontos de monitoramento de águas subterrâneas – Piezômetros.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atributos e considerações técnicas mínimas para seleção da área para aterro sanitário de resíduos não perigosos de acordo com a NBR 13896/97.....	17
Tabela 2 – Condições para projeto, implantação e operação de aterro sanitário.....	22
Tabela 3 – Municípios Limítrofes de Canindé.....	28
Tabela 4 – Composição da população de Canindé.....	31
Tabela 5 – Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Domiciliares Depositados no Aterro Sanitário de Caucaia/CE.....	36
Tabela 6 – Dados para a estimativa de volume.....	38
Tabela 7 – Instruções para a consideração do sistema de drenagem dos gases.....	42
Tabela 8 – Situações de materiais analisados de acordo com os parâmetros de entrada.....	44
Tabela 9 – Estimativa de população e Volume.....	46
Tabela 10 – Estimativa das dimensões das células padrão do aterro.....	47
Tabela 11 – Dimensões das Células Totais Inferior e Superior.....	49
Tabela 12 – Cálculo da vazão média do lixiviado.....	52
Tabela 13 – Cálculo da área de contribuição do aterro para o dreno.....	52
Tabela 14 – Cálculo da altura do dreno cego retangular.....	53
Tabela 15 – Cálculo do espaçamento dos drenos.....	53
Tabela 16 – Situações de materiais analisados de acordo com o fator de segurança.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PERS	Política Estadual de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PVC	Policloreto de Vinila
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
UFC	Universidade Federal do Ceará
SIBI	Sistema Integrado de Bibliotecas
trad.	Tradutor

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	14
1.2 JUSTIFICATIVA	15
1.3 OBJETIVOS.....	15
1.3.1 Geral.....	15
1.3.2 Específicos	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 LEGISLAÇÃO E NORMATIZAÇÃO	17
2.2 SELEÇÃO DA ÁREA	18
2.3 IMPACTOS AMBIENTAIS	20
2.3.1 Meio físico.....	20
2.3.2 Meio biótico.....	21
2.3.3 Meio socioeconômico.....	21
2.4 TIPOS DE ATERROS SANITÁRIOS	21
2.4.1 Aterro sanitário convencional.....	22
2.4.2 Aterro de pequeno porte	22
2.5 PROJETO, IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO DO ATERRO SANITÁRIO	23
2.6 PROJETO ESTRUTURAL DO ATERRO SANITÁRIO	23
2.6.1 Método construtivo	23
2.6.2 Revestimento de fundo e cobertura final.....	24
2.6.3 Drenagem de lixiviados (lagoa).....	25
2.6.4 Drenagem de gases	26
2.6.5 Drenagem de águas superficiais	27
2.6.6 Monitoramento	27
2.6.7 Encerramento	29
2.7 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	29
2.7.1 Características do município.....	29
2.7.2 População.....	30
2.7.3 Pluviometria.....	31
2.7.4 Geologia	31
2.7.5 Hidrologia.....	33
2.7.6 Resíduos sólidos urbanos	36
3 METODOLOGIA.....	38
3.1 SELEÇÃO DA ÁREA.....	38
3.2 CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO DO ATERRO SANITÁRIO	38
3.2.1 Estimativa de volume e população	38
3.2.2 Método construtivo	39
3.2.3 Dimensionamento das células totais.....	40
3.2.4 Revestimento de fundo.....	41
3.2.5 Dimensionamento dos drenos e lixiviado	41
3.2.6 Dimensionamento da lagoa de lixiviados	42
3.2.7 Cobertura final do aterro sanitário.....	43
3.2.8 Sistema de drenagem de gases	43
3.2.9 Sistema de drenagem de águas pluviais.....	44
3.3 ESTABILIDADE DOS TALUDES	44

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1 SELEÇÃO DA ÁREA	46
4.2 CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO DO ATERRO	46
4.2.1 Estimativa de Volume e População	47
4.2.2 Método Construtivo	48
4.2.3 Dimensionamento das células totais	49
4.2.4 Revestimento de fundo.....	51
4.2.5 Dimensionamento dos drenos e lixiviado	53
4.2.6 Dimensionamento da lagoa de lixiviados	55
4.2.7 Cobertura final do aterro sanitário.....	56
4.2.8 Sistema de drenagem de gases	56
4.2.9 Sistema de drenagem de águas pluviais.....	58
4.3 ESTABILIDADE DOS TALUDES	59
4.4 MONITORAMENTO DO ATERRO SANITÁRIO	60
4.4.1 Monitoramento dos líquidos (lixiviados, águas superficiais e subsuperficiais)...	60
4.4.2 Monitoramento de gases.....	61
4.4.3 Monitoramento geotécnico	61
4.5 ENCERRAMENTO DO ATERRO SANITÁRIO	62
5 CONCLUSÃO.....	63
REFERÊNCIAS	65
APÊNDICE A – MARCOS REGULATÓRIOS.....	68

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Aterros sanitários, quando executados e operados de forma adequada, são considerados como um dos métodos mais adequados para receber os resíduos sólidos gerados por um município. Esse tipo de infraestrutura tem como principal característica permitir a disposição final dos mais diversos tipos de resíduos de origem urbana (COLVERO *et al.* 2017; CEMPRE, 2018). Segundo Abrelpe (2018), 40,9% dos resíduos coletados em território brasileiro foram direcionados para 2.976 lixões, acrescentando a quantidade de 8,8% que não foram coletados, inferindo a sua destinação em locais inapropriados (ABRELPE, 2018; ISWA, 2016). Dessa forma, a quantidade de aterros sanitários ativos no Brasil ainda está muito longe de ser o número adequado, e o número de lixões é quase o dobro em relação aos aterros sanitários (ABREU, 2019).

Em se tratando de termos legislativos, no Brasil há normas e leis que definem critérios para a destinação adequada dos resíduos, sendo importante citar: a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), determina que todos os municípios do Brasil devem ter como forma de descarte de rejeitos o aterro sanitário, e estabelece ações necessárias para a correta disposição final de resíduos no Brasil, além de ter como objetivo a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos .

A resolução CONAMA nº 404 (CONAMA, 2008), que constitui critérios para o licenciamento ambiental de aterro sanitário de pequeno porte, determina que esses aterros são aqueles que recebem até 20 toneladas de resíduos. No Estado do Ceará foi instituída a Lei Estadual nº 16.032, disciplinando a Política Estadual de Resíduos Sólidos (PERS) no Estado, em seus propósitos traz o tratamento dos resíduos através da ação conjunta entre poder público e esfera privada.

Ao todo, no Estado do Ceará, existem seis aterros sanitários (SNIS, 2018), sendo o maior deles situado na Região Metropolitana de Fortaleza: o Aterro Sanitário de Caucaia, com 123 hectares (RIBEIRO, 2019). Enquanto o número de lixões presentes no estado, o último levantamento feito, no ano de 2017, indica a existência de 310 lixões ativos (SALES, 2020). As estimativas são de, aproximadamente, 55,1% dos resíduos coletados ainda sejam destinadas para lixões e aterros controlados no Ceará (FREIRE *et al.*, 2022).

Essa discrepância pode estar relacionada a diversos fatores, principalmente devido aos custos mais elevados, muitas vezes os aterros sanitários não são uma escolha popular em

países em desenvolvimento, mesmo com grande geração de resíduos (RAHIM, 2021). A relevância de aterros sanitários como destinação final não só envolve suas medidas mitigadoras, mas, também, pode servir como uma alternativa de desenvolvimento sustentável (KORHONEN *et al.* 2018; HOGLAND *et al.* 2017; LANER *et al.* 2019; DEVADOSS *et al.* 2021).

1.2 Justificativa

Em razão da importância e relevância, bem como da dificuldade de encontrar trabalhos e projetos e pesquisa que mostrem todas as etapas de um projeto de aterro sanitário, como: dimensionamentos de células, drenagens de gases, águas pluviais, drenos e lixiviado, lagoa de lixiviado, camada de impermeabilização e cobertura final, além da simulação de estabilidade dos taludes e maciços de resíduo e o direcionamento para o monitoramento durante e após encerramento do aterro.

Este trabalho apresenta um projeto de aterro para o município de Canindé, na região Centro-Norte do Estado do Ceará, com potencial de atender uma população de até 82 mil habitantes, com horizonte de projeto de 15 anos. Este projeto apresenta uma proposta de aterro sanitário para uma cidade de médio porte, porém com todos os requisitos exigidos para assegurar a qualidade ambiental durante e após o encerramento das atividades de disposição dos resíduos. São apontados os critérios estabelecidos para esse projeto com descrição de como serão dispostas as células do aterro, além de todos os critérios de construção, monitoramento e encerramento.

Para isso, este trabalho teve como base legal a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que determina a necessidade de uma disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, associado ao fechamento dos lixões ativos em todos os municípios do território nacional. E, para dimensionamento do aterro, foram usados principalmente as normas regulamentadoras NBR 13896/97, NBR 8419/92, e NBR 15879/2010.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Dimensionar um projeto de aterro sanitário convencional de resíduos sólidos urbanos para uma cidade de médio porte.

1.3.2 Específicos

- i) Elencar as variáveis que afetam o projeto;
- ii) Analisar os aspectos técnicos relativos ao projeto estrutural do aterro;
- iii) Propor uma metodologia para implantação de aterros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Legislação e normatização

A Lei 12.305 de 2 de agosto de 2010 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que dispõe sobre a gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, determina a destinação e a disposição final ambientalmente adequada para estes resíduos, com exceção aos rejeitos radioativos, de modo a minimizar os impactos ao meio ambiente e à saúde pública.

De acordo com a PNRS (BRASIL, 2010), destinação final dos resíduos inclui a reutilização, reciclagem, compostagem e reutilização energética, além de melhores práticas, como a redução da geração, que irão minimizar a quantidade de resíduos encaminhados para a disposição final.

A disposição final dos rejeitos deve ser os aterros sanitários, desde que estejam de acordo com as normas de operação, uma vez que a PNRS determina a eliminação e recuperação dos lixões devido aos severos impactos ambientais causados pela atividade de disposição inapropriada.

A Norma Brasileira Regulamentar NBR 10004:2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT classifica os resíduos sólidos considerando seus processos de origem, suas propriedades e constituintes. Segundo a norma, os resíduos sólidos são definidos como aqueles em estados sólido e semi-sólido de origens doméstica, comercial, industrial, hospitalar e provenientes de serviços, de varrição e resíduos agrícola (ABNT, 2004).

Os resíduos são classificados, ainda pela NBR 10004 (ABNT, 2004), em resíduos Classe I – perigosos e resíduos Classe II – não perigosos. Estes podem ser subdivididos em resíduos classe II A, os não inertes, cujas propriedades podem ser a sua biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água; e resíduos classe II B, os inertes, são aqueles que seus constituintes não solubilizam em contato com água destilada ou deionizada, acima dos padrões de potabilidade da água.

A NBR 13896 da ABNT de 1997 trata sobre aterros de resíduos não perigosos, determinando as condições mínimas para os critérios de projeto, implantação e operação, visando a proteção das áreas de implantação e próximas ao aterro.

Quanto a aterros de pequeno porte, tem-se a Resolução CONAMA nº 404 de 2008, “estabelece critérios e diretrizes para o licenciamento ambiental de aterro sanitário de pequeno porte de resíduos sólidos urbanos”. Determina que o licenciamento dessa obra seja realizado simplificadamente, considerando as dificuldades enfrentadas pelos municípios de pequeno

porte. Como norma regulamentadora, a NBR 15849 de 2010 determina as “diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento” para aterros sanitários de pequeno porte destinados à resíduos sólidos urbanos (RSU).

2.2 Seleção da área

A escolha da área para implantação e operação do aterro é crucial para o seu bom desempenho, sendo uma das principais etapas do projeto. A correta seleção da área pode reduzir custos com terraplanagem, material de cobertura, vias de acessos e, quando realizada seguindo as limitações regulamentadas nas normas, podem minimizar impactos ambientais resultantes da poluição do solo e dos corpos hídricos (RECESA, 2008).

A NBR 13896 de junho de 1997 determina que o local para disposição dos resíduos sólidos não perigosos deve ser tal que os impactos ambientais causados sejam minimizados, com aceitação da população maximizada, de acordo com o zoneamento da região de instalação e com disponibilidade de tempo de uso longo e que não demande muitas obras para o início da operação (ABNT, 1997).

Desse modo, para minimizar impactos ao meio ambiente, a NBR 13896 estabelece ainda critérios para a adequabilidade do local, baseada nas condições técnicas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Atributos e considerações técnicas mínimas para seleção da área para aterro sanitário de resíduos não perigosos de acordo com a NBR 13896/97.

CRITÉRIO	ATRIBUTO TÉCNICO
Topografia	Declividade superior a 1% e inferior a 30%
Geologia e tipos de solo	Coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-6} cm/s Zona não saturada com espessura superior a 3,0m
Recursos hídricos	Distância mínima de 200 m de qualquer coleção hídrica ou curso d'água
Vegetação	Deve ser tal que ajude na redução da erosão, formação de poeira e no transporte de odores
Acessos	Regiões de fácil acesso, e que não necessite de grandes obras
Tamanho disponível e vida útil	Vida útil mínima de 10 anos
Custos	Deve ser tal que viabilize economicamente a construção do aterro (conforme seu tamanho e seu método construtivo)

Distância mínima de núcleos populacionais	Superior a 500 m
Distância de áreas de risco	O aterro não deve ser instalado em áreas de risco, como regiões sujeitas a inundação, com períodos de recorrência de 100 anos
Nível do lençol freático	Deve possuir uma camada de solo insaturado mínima de 1,5 metros, da camada inferior do aterro até o nível do lençol freático, medidos em períodos de maior precipitação pluviométrica
Uso do Solo	Deve estar de acordo com a Lei de uso e ocupação do solo.
Permeabilidade mínima	O solo predominante na região deve possuir coeficiente de permeabilidade inferior a 5×10^{-5} cm/s

Fonte: Adaptado de ABNT (1997).

Desse modo, o processo de escolha de área se baseia em levantamentos de dados secundários e primários da região. Antes de tudo, deve-se realizar a caracterização do local, com auxílio de representações cartográficas da região, com suas rotas e vias, principais empreendimentos, maiores concentrações demográficas, demarcações de bairros e distritos, pluviometria e dados climáticos (ABNT, 1992). O levantamento de dados de imagens de satélite, mapas temáticos com topografia, geologia, geomorfologia, pedologia, hidrologia e bacias hidrográficas, vegetação, relevo, cartografia e fotos aéreas são indispensáveis ferramentas nessa etapa (CEMPRE, 2018).

Os dados de aspectos legais e institucionais são fatores determinantes na escolha da área, pois baseia-se na Lei de Uso e Ocupação do solo do município, além da Lei Orgânica, legislações municipais, estaduais e federais, e o zoneamento ambiental, identificando as unidades de conservação e áreas de proteção ambiental e proteção de mananciais (ABNT, 1992).

A partir desses dados, é possível analisar as áreas susceptíveis a receber o aterro, através da identificação de corpos hídricos, topografias, vias de acesso, regiões com vegetação nativa, feições estruturais, como falhas e fraturas (CEMPRE, 2018). Assim, avalia-se os critérios por etapas, os que envolvem o meio físico – solo, corpos hídricos, topografias, estruturas geológicas e geomorfológicas; meio biótico – fauna e flora, reservas naturais, áreas de preservação; e meio socioeconômico – distância dos centros populacionais, vias de acesso, distância de aeródromos (ABNT, 1992). Para isso, é ideal a criação de um mapa com todas as áreas favoráveis demarcadas, assim como os principais empecilhos, a fim de facilitar na escolha adequada.

Na análise do meio socioeconômico, o projetista deve ter a sensibilidade para escolher uma área que não prejudique o bem-estar da população que reside próximo à área, ou que cause até desvalorização da área. Desse modo, deve-se avaliar cautelosamente a lei de uso e ocupação para analisar e evitar os maiores centros demográficos do município, ou que não cause congestionamento nas principais vias da região (CEMPRE, 2018).

O levantamento de dados primário deve ser realizado nas áreas selecionadas com o objetivo de averiguar as condições reais no ambiente, físicas, bióticas e antrópicas, de modo semi-detalhado, e além disso, poderão surgir novos fatos que irão pesar na escolha (ABNT,1992). Como critério de escolha, pode-se descartar as áreas desfavoráveis.

Por fim, na fase decisória, são necessárias investigações detalhadas nas áreas potenciais, podendo assim inferir as áreas mais propícias à escolha e, caso necessário, deve-se realizar audiência pública, para garantir a aceitação da população (CEMPRE, 2018).

2.3 Impactos ambientais

O aterro sanitário é projetado para ser de baixo potencial causador de impactos ambientais, desde a etapa de implantação e operação até seu encerramento e após o encerramento das suas atividades (ABNT, 1997). Porém, ainda podem haver alterações significantes no meio ambiente que deverão ser monitoradas (monitoramento ambiental) adequadamente em curtos intervalos de tempo.

2.3.1 Meio físico

No meio físico, o lixiviado, produzido através da decomposição da matéria orgânica, pode poluir o solo por infiltração, podendo chegar em possíveis mananciais hídricos subterrâneos e até superficiais. Para isso, é destaque a necessidade de uma camada impermeabilizante, além de serem realizados periodicamente o monitoramento dos drenos, assim como realizar inspeções e análises nos corpos hídricos próximos (RECESA, 2008).

A poluição do ar por material particulado, a poeira, é causada pela movimentação do solo e pelo trânsito de maquinários e veículos, e ainda há a poluição pela liberação de gases gerados pela decomposição da matéria orgânica que saem pelos drenos verticais. O aumento dos ruídos causados também pela operação do aterro é outro fator inevitável que pode afetar a população próxima, assim como odores provindos da movimentação dos resíduos, desde os veículos, até na etapa de recobrimento (RECESA, 2008).

Quando utilizado solo nas camadas de impermeabilização do aterro, geralmente removidos em áreas próximas, sua área de origem irá ser diretamente afetada, podendo causar a retirada da vegetação nativa, causando fragilização e instabilização do solo, tornando-o propício ao fenômeno da erosão e ainda alteração da paisagem natural, podendo afetar até a fauna local (SANTOS, 2014; BORGES, 2016).

Em menor grau, poderá haver arraste de solo da cobertura em casos de precipitações pluviométricas e correntes de ar, podendo causar assoreamento de cursos de água, assim como pode desestabilizar os maciços, quando somados a outros fatores técnicos. Quanto aos resíduos, pode ocorrer a poluição da área próxima caso haja o seu espalhamento devido o vento.

2.3.2 Meio biótico

Como há ocupação de uma área, muitas vezes de significativa proporção, poderá causar supressão da vegetação, causando alteração do habitat de diversas espécies, ou seja, degradando a fauna e flora local (RUFO; PIKANÇO, 2005). Porém, após encerramento das atividades, o aterro poderá ser revegetado, sob condições que não prejudiquem a sua estrutura.

Através da desestabilização do habitat de diversas espécies de animais, e com o intenso fluxo de veículos, alguns podem ser atropelados durante o período de operação do aterro. Inevitavelmente, o aterro irá gerar aumento de vetores, insetos, roedores e aves, e alteração da paisagem natural (BORGES, 2016).

2.3.3 Meio socioeconômico

Durante a instalação e operação do aterro, haverá um aumento do tráfego em vias de acesso, assim como alteração dessas vias para seu melhor funcionamento. Um fator negativo para a população é a desvalorização da área, uma vez que obras desse tipo ainda são mal vistas pela sociedade. Além disso, dependendo do caso, pode ser necessária a desapropriação da área (BORGES, 2016). Porém, uma obra de aterro sanitário causa impactos positivos sociais, econômicos e culturais. Poderá gerar renda e empregos, irá melhorar a qualidade de vida da população atendida.

2.4 Tipos de aterros sanitários

Quando se trata de resíduos não perigosos de classe II, é possível trabalhar com dois tipos de aterro sanitário, o convencional e o aterro sanitário de pequeno porte, que podem ser chamados de aterros energéticos, quando há o aproveitamento dos gases gerados. Os resíduos que podem ser destinados para este aterro são os resíduos sólidos urbanos, resíduos hospitalares, industriais não perigosos e todos determinados na NBR 10004 de 2004.

Existe ainda aterro que recebe resíduos Classe I, o aterro sanitário para resíduos perigosos. Geralmente recebe resíduos de indústrias, que não podem ser confinados de qualquer forma na natureza, devido aos riscos que podem causar pelas substâncias nocivas que o constituem.

2.4.1 Aterro sanitário convencional

O aterro sanitário convencional por definição da NBR 15849 de 2010, é aquele 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”. Para isso, o aterro deve estar em uma área perfeitamente delimitada, sua estrutura deve conter sistema de impermeabilização, sistema de drenagem de lixiviado, de gases e de águas pluviais, lagoa de lixiviados e camada de cobertura (ABNT, 2010).

Os resíduos devem ser compactados e cobertos diariamente, formando células pré-dimensionadas que serão construídas e dispostas em sequência e, após o fim de cada célula ativa, elas recebem a cobertura final. Durante o período de operação e após encerramento, serão necessários sistemas de monitoramento de águas subterrâneas e superficiais, geotécnico e que atenda qualquer demanda do aterro e, por fim, para evitar interferências externas, um sistema de isolamento físico (ABNT, 1997).

2.4.2 Aterro de pequeno porte

Um aterro sanitário de pequeno porte, de acordo com a NBR 15849 de 2010, define-se como aquele que “quando definido por legislação local, em que, considerados os condicionantes físicos locais, a concepção do sistema possa ser simplificada, adequando os sistemas de proteção ambiental sem prejuízo da minimização dos impactos ao meio ambiente e a saúde pública”.

Esse tipo de aterro recebe até 20 toneladas de RSU por dia e é adequado para regiões com baixa densidade populacional, porém, possui a mesma estrutura e critérios do aterro convencional, embora seu método construtivo preferencial seja o uso da técnica de operação em valas ou trincheiras.

2.5 Projeto, implantação e operação do aterro sanitário

Para o bom funcionamento do aterro sanitário, a garantia da saúde e segurança da saúde pública e a minimização dos impactos negativos ao meio ambiente, são necessários alguns cuidados nas etapas de projeto, instalação e operação do aterro. A NBR 13.896/1997 estabelece critérios e condições a localização, segregação e análise de resíduos, monitoramento, inspeção, fechamento da instalação e treinamento de pessoal. A Tabela 2 apresenta uma lista de condições a serem seguidas.

Tabela 2 – Condições para projeto, implantação e operação de aterro sanitário.

CONDIÇÕES GERAIS	Escolha de área
	Isolamento e sinalização
	Acessos
	Iluminação e força
	Comunicação
	Treinamento
	Análise e amostragem de resíduos
CONDIÇÕES ESPECÍFICAS	Proteção das águas subterrâneas e superficiais
	Impermeabilização do aterro, drenagem e tratamento do líquido percolado
	Emissões gasosas
	Segurança do aterro
	Inspeção e manutenção
	Procedimentos para registro da operação
Plano de encerramento e cuidados para fechamento do aterro	

Fonte: adaptado de ABNT (1997).

2.6 Projeto estrutural do aterro sanitário

2.6.1 Método construtivo

O aterro sanitário deve possuir um método construtivo definido de acordo com a caracterização topográfica, geológica e geotécnica do local. De acordo com a norma NBR 15.849/2010, esses métodos construtivos podem ser definidos como:

- Rampa ou encosta, “caracterizada pelo uso de taludes preexistentes, usualmente implantado em áreas de ondulações ou depressões naturais e encostas de morros”.
- Área, “caracterizada pela disposição em áreas planas acima da cota do terreno natural”.
- Valas, “escavação com profundidade limitada e largura variável, confinada em todos os lados, oportunizando operação não mecanizada”.
- Trincheira, que difere das valas pois sua escavação não possui limitação e é confinado em apenas dois lados.

2.6.2 Revestimento de fundo e cobertura final

2.6.2.1 Revestimento de fundo

O aterro sanitário deve ser totalmente impermeabilizado para evitar a entrada e saída de fluidos, como vazamentos e infiltrações, para o meio ambiente sem qualquer tratamento. Quando o solo do aterro não possui coeficiente de permeabilidade adequado para evitar que o lixiviado percole no solo, deve ser implantado uma camada impermeabilizante sob a massa de resíduos (ABNT, 1997). Essa camada deve ter propriedades determinadas pela NBR 13.896, como ser constituída de materiais compatíveis com o resíduo quimicamente, possuir espessura e resistência, ser assentada em uma fundação capaz de suportar o peso do aterro, seus aos gradientes de pressão acima e abaixo da impermeabilização, para garantir que não aconteça a sua ruptura causada por:

- Pressão hidrostática e hidrogeológica;
- Contato físico com o percolado e o resíduo;
- Condições climáticas;
- Tensões da instalação da impermeabilização;
- Tensões originárias da operação diária;
- Assentamento, compressão e levantamento do aterro.

Essa camada é instalada por toda a área do aterro, inclusive nos taludes, para evitar o contato com o solo. Ela pode ser composta de materiais naturais, como os solos argilosos, e artificiais, os geossintéticos como a geomembrana e os geotêxtis, ou mista, uma junção dos dois tipos de materiais (RECESA, 2008).

Junto a esse sistema, é instalado um equipamento de detecção de vazamentos imediatamente abaixo da camada de revestimento de fundo, que irá apontar uma eventual falha da impermeabilização através da coleta e transporte desse fluido vazado até um ponto de observação isolado de qualquer outra contribuição (ABNT, 1997).

2.6.2.2 Cobertura final

O aterro sanitário está suscetível as ações das chuvas e do ar, que podem causar o arraste dos resíduos pelos ventos, a infiltração dos líquidos pluviais ao maciço de resíduos e erosão, além da proliferação de vetores e a exalação de odores e gases são utilizados dois tipos de coberturas para isolamento dos resíduos (ABNT, 2010). A primeira é a cobertura temporária ou operacional, utilizada ao fim da diária de atividades, durante a execução da célula ativa. Essa cobertura consiste em apenas uma camada de solo ou material reutilizável ou mesmo resíduo de construção civil, para evitar o espalhamento dos resíduos.

A cobertura final, por sua vez, tem a função de proteger os resíduos dispostos e toda as estruturas e equipamentos dos intemperes do meio ambiente, da infiltração e possibilitar o reuso da área após o encerramento devido ao fechamento definitivo de todo o maciço do aterro (ABNT, 2010). É permitido a inserção de vegetação na cobertura desde que as mesmas não possuam raízes verticais que poderiam rasgar a camada e afetar o seu funcionamento.

2.6.3 Drenagem de lixiviados (lagoa)

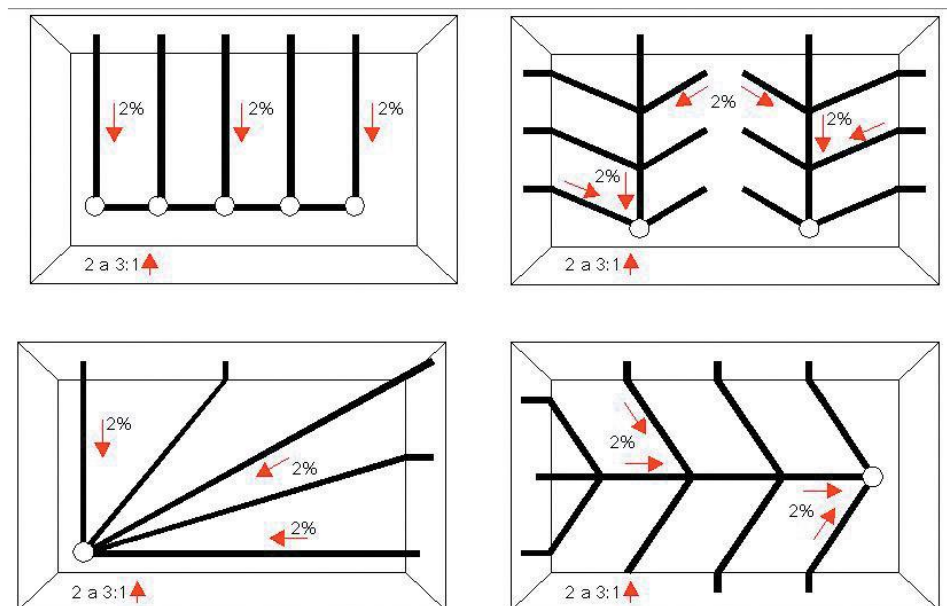
A fração de resíduos orgânicos que são encaminhados ao aterro sanitário quando decompostos, as águas pluviais que conseguem infiltrar no maciço de resíduos e a umidade dos resíduos dispostos geram, a curto e longo prazo, um líquido chamado lixiviado (ABNT, 2010). Esse líquido possui um alto teor orgânico, além de poder conter metais pesados e substâncias tóxicas que podem se acumular na camada impermeabilizante, podendo afetar o funcionamento da mesma, ou mesmo interferir na estabilidade da massa de resíduos.

Para isso, o aterro sanitário deve conter um sistema de drenagem que capta e transporta esse efluente, que flui por gravidade, para uma lagoa de armazenamento e o futuro

tratamento do lixiviado, forma de reduzir os índices de qualidade de água para se adequar à disposição final exigida pelas legislações, removendo assim esse líquido que percola no maciço. (ABNT, 1997).

Os principais sistemas drenantes utilizados em aterros sanitários são o colchão drenante, que corresponde a uma camada drenante presente em toda a área do aterro, e a espinha de peixe, que possui drenos que atingem toda a área, porém com menor custo de produção e eficiência. Esse tipo de rede drenante possui diferentes configurações (Figura 1) que vão depender da topografia local e da forma das células do aterro (RECESA, 2008).

Figura 1 – Diferentes configurações dos drenos espinha de peixe.



Fonte: RECESA (2008).

2.6.4 Drenagem de gases

A decomposição da matéria orgânica dentro das células do aterro ocorre em condições anaeróbias formando principalmente dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4), chamados de biogás ou gás bioquímico (GBQ), o popular gás de aterro (ABNT, 1992). A NBR 13.896 fixa que o aterro deve reduzir ao máximo a emissão desses gases ao meio ambiente e através da sua captação para o seu aproveitamento ou tratamento, que consiste na queima em condições adequadas para reduzir seu efeito poluidor (ABNT, 1997).

Esses gases estão presentes por todo o maciço de resíduos e serão captados por drenos verticais, com início na rede de drenagem de lixiviados até a superfície acima do aterro,

dispostos por toda área do aterro e percorrendo toda sua altura (ABNT, 1992;2010). Esses drenos são constituídos de meio poroso, principalmente por brita, e possuem diâmetro que varia de 50 a 150 cm, dependendo do porte do aterro (RECESA, 2008) e com raio de influência entre os drenos de até 30 metros (ABNT, 2010).

2.6.5 Drenagem de águas superficiais

O aterro sanitário, por ser ao ar livre, está sujeito a interferências do meio ambiente como as ações dos ventos e das águas pluviais. Essas águas podem infiltrar no maciço, causar instabilidade dos taludes e acarretar em caminhos preferenciais geradores de erosão, formar poças de água na área de disposição dos resíduos e nos acessos e até mesmo comprometer as camadas de coberturas (ABNT, 2010). Desse modo, torna-se necessário ao projeto do aterro o dimensionamento da rede de drenagem de águas superficiais.

Essa rede de drenagem deve estar presente em toda a área externa, os entornos do aterro, e interna, inclusive sobre o maciço de resíduos, para captar e desviar o aporte das águas escoadas (ABNT, 1997). Essas estruturas possuem inclinação que permita o escoamento do líquido e dissipadores de energia para reduzir a velocidade de escoamento das águas e são formadas por drenos escavados no solo, canaletas de concreto ou material drenante como britas e devem possuir uma camada de impermeabilização para impedir a infiltração das águas ao solo. Esses equipamentos são de fácil deterioração devido às ações das águas, então é necessário o constante monitoramento para não afetar a funcionalidade dos drenos (RECESA, 2008).

2.6.6 Monitoramento

Os sistemas de monitoramento devem ser projetados de modo a garantir o bom funcionamento e a eficiência do aterro sanitário quando a garantia de qualidade ambiental e a segurança pública. Nessa etapa devem ser realizados com periodicidade definida pelo projetista durante a vida útil do aterro e em até, no mínimo, 20 anos após o encerramento das atividades.

2.6.6.1 Monitoramento das águas superficiais

O monitoramento das águas superficiais é uma avaliação temporal das alterações da qualidade das águas superficiais próximas ao aterro ou que podem contribuir com ocasional impacto ambiental por contaminação. Para tanto, são necessárias uma avaliação sistemática que

envolve estruturas, instrumentos e procedimentos realizados durante e após a operação do aterro sanitário (ABNT, 2010).

A NBR 15.849 determina que o monitoramento deve conter:

- Definição de parâmetros físicos, químicos e biológicos;
- Definição dos pontos de coleta a montante e a jusante do ponto de lançamento de efluente do sistema de tratamento e do aterro sanitário e a frequência de amostragem.

2.6.6.2 Monitoramento das águas subterrâneas

Para manter os padrões de qualidade de água exigidos pelas legislações, mesmo com a operação do aterro, além das camadas impermeabilizantes e as redes de drenagem, é necessário um sistema de monitoramento temporal das águas subterrâneas realizado através de poços que irão avaliar se há influências do percolado nos lençóis freáticos (ABNT,1997).

Esse monitoramento deve ser realizado a montante da área de disposição de resíduos com o intuito de analisar a qualidade de água original e se ela possui influência do aterro, quando comparado aos poços a jusante. Devem ser instalados um ou mais poços para o monitoramento a montante, de acordo com a NBR 13.895 (ABNT, 1997).

Devem ser instalados três ou mais poços a jusante com o intuito de analisar a pluma de contaminação dos resíduos. Essa análise deve realizada ao decorrer do comprimento da pluma, em pontos distintos de concentração da contaminação, e o mais próximo possível do aterro, para agilizar a identificação da pluma (ABNT, 1997).

Vale ressaltar a importância de analisar o sentido do fluxo hídrico do lençol freático e o sentido da pluma de contaminação, que, quando desconhecida, indica-se aumentar o número de poços. Essa verificação é crucial para a instalação do sistema de monitoramento. Esses poços devem ter no mínimo 4 polegadas de diâmetro (101,6 mm) e na sua parte superior, devem ser revestidos e tampados para não contaminar as amostras (ABNT, 1997).

2.6.6.3 Monitoramento dos gases

Devem ser analisadas as emissões dos gases produzidos no aterro para avaliar a qualidade do ar, e garantir que estejam conforme determina a resolução CONAMA 491/2018. Esse processo envolve a medição da concentração e vazão dos gases gerados no aterro (ABNT,1997).

2.6.6.4 Monitoramento geotécnico

Os taludes e os maciços estão sujeitos as ações das águas pluviais e erosão causadas pela força das águas em escoamento. Os resíduos estão em constante movimentação devido a produção do percolado e gases e a compactação devido ao assentamento dos resíduos. Quando a célula é encerrada, ou mesmo durante o funcionamento do aterro, podem crescer plantas cujas raízes pode afetar tanto as camadas de cobertura quanto os taludes.

Esses fatores podem gerar instabilidades que afetam a segurança dos taludes, como o deslocamento horizontal e vertical dos materiais contidos e solos utilizados. O monitoramento geotécnico consiste na análise do comportamento mecânico dos maciços, suas movimentações e a situação da estabilidade dos taludes (ABNT, 2010).

2.6.7 Encerramento

O projeto do aterro sanitário deve conter, além do plano de monitoramento, o de encerramento, que irá determinar os procedimentos a serem realizados no seu período pós atividades e nos próximos 20 anos. A NBR 13.896 (1997) determina que o plano de encerramento deve conter:

- a) medidas que devem promover a desativação;
- b) operações de manutenção que devem ser observadas após o fechamento;
- c) estimativas da qualidade e da quantidade dos resíduos dispostos até a data do fechamento;
- d) usos do local após o término das operações.

2.7 Caracterização da área

2.7.1 Características do município

Com uma área de 3218,5 km², o município de Canindé está localizado na região Centro-Norte, na latitude 4° 21' 32" sul e longitude 39° 18' 42" oeste, a uma altitude de 149,73 m. A cidade está a uma distância em linha reta da capital de 114 km, seus municípios limítrofes estão na Tabela 3.

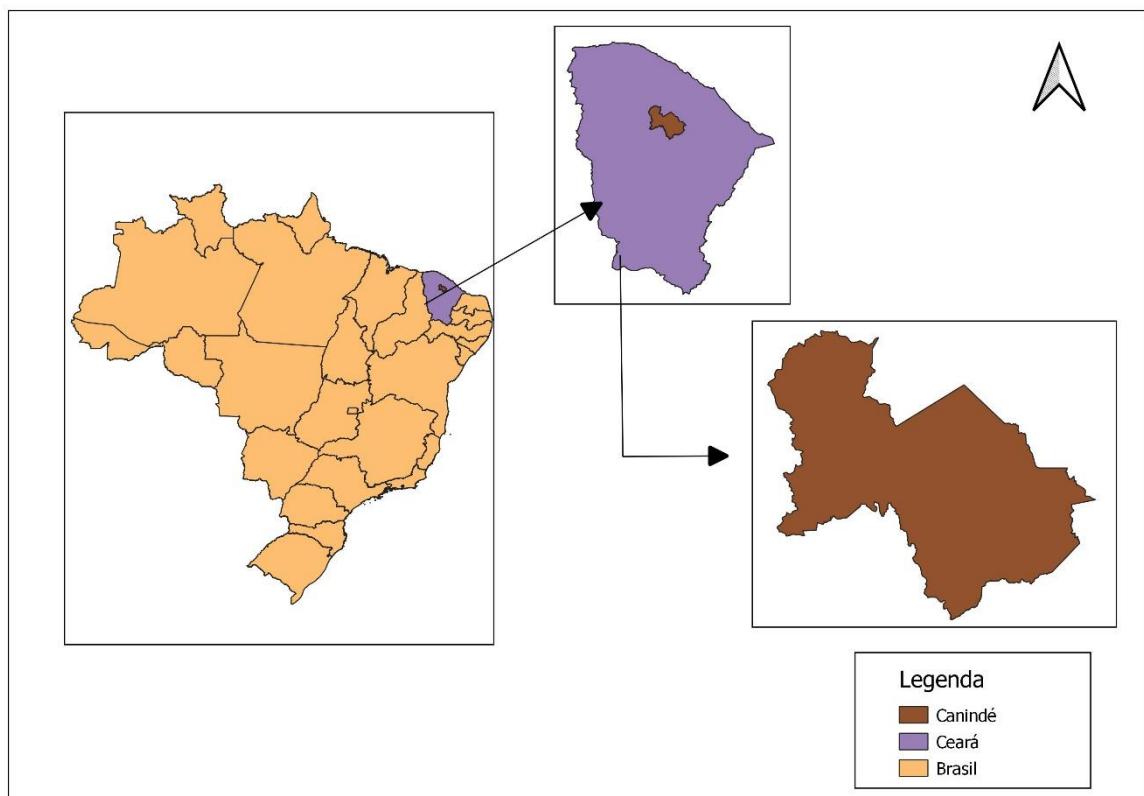
Tabela 3 – Municípios Limítrofes de Canindé.

MUNICÍPIOS LIMÍTROFES			
NORTE	SUL	LESTE	OESTE
Caridade	Itatira	Itapiúna	Irauçuba
Paramoti	Madalena	Aratuaba	Sobral
General Sampaio	Choro	Mulunga	Santa Quitéria
Tejuçuoca		Caridade	
Irauçuba			

Fonte: IBGE, 2010.

A localização de Canindé em mapa está representada na Figura 2.

Figura 2 – Localização de Canindé.



Fonte: Elaborado pelo autor

2.7.2 População

A estimativa da população de Canindé, de acordo com o censo demográfico do IBGE de 2010, era de 74.473 habitantes. Desse total, 62,94% da população reside na zona urbana, o que equivale a 46.875 habitantes. Na Tabela 4 estão representados dados da população de Canindé.

Tabela 4 – Composição da população de Canindé.

Zona	POPULAÇÃO – 2010 (IBGE)	
	Número de Habitantes	%
Urbana	46.875	62,94
Rural	27.598	37,06
Total	74.473	100

Fonte: IBGE, 2010

Como apresentado, a maior parte da população está localizada na zona urbana. Tal parcela da população recebe coleta domiciliar de resíduos sólidos urbanos (RSU), sendo, desse modo, considerado nos cálculos de projeto do aterro.

2.7.3 Pluviometria

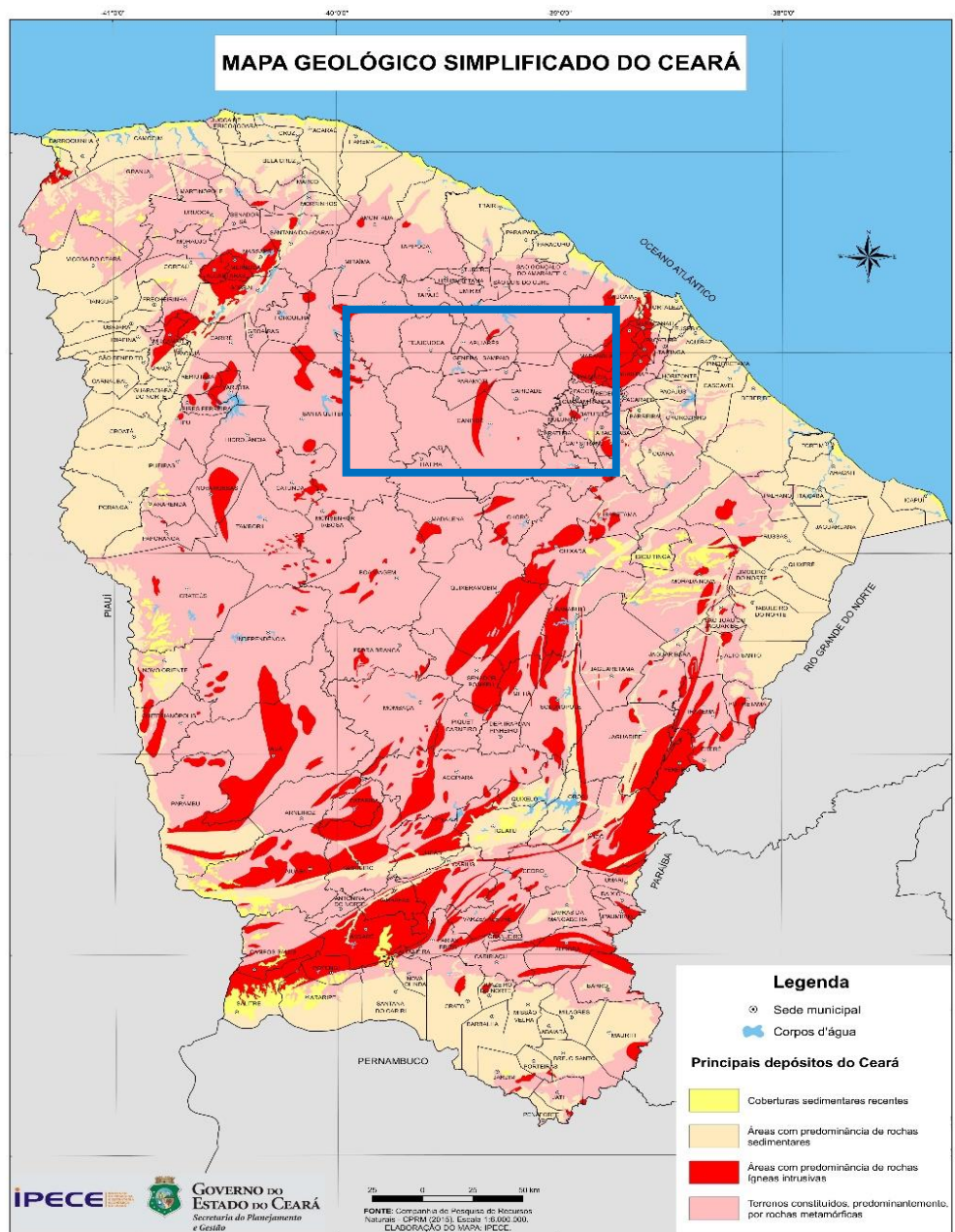
Localizada no Nordeste do Brasil, o clima de Canindé é Tropical Quente Semiárido e Tropical Quente Semiárido Brando, com temperatura média de 26° a 28° e pluviosidade de 756,1 mm distribuída principalmente nos meses de fevereiro a abril, com maiores valores de precipitações do ano (IPECE, 2017). Setembro possui o menor nível de precipitação, com apenas 1mm, e março, com o maior nível, com uma média de 183 mm. A cidade não possui nenhuma estação pluviométrica, o que explica a falta de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

2.7.4 Geologia

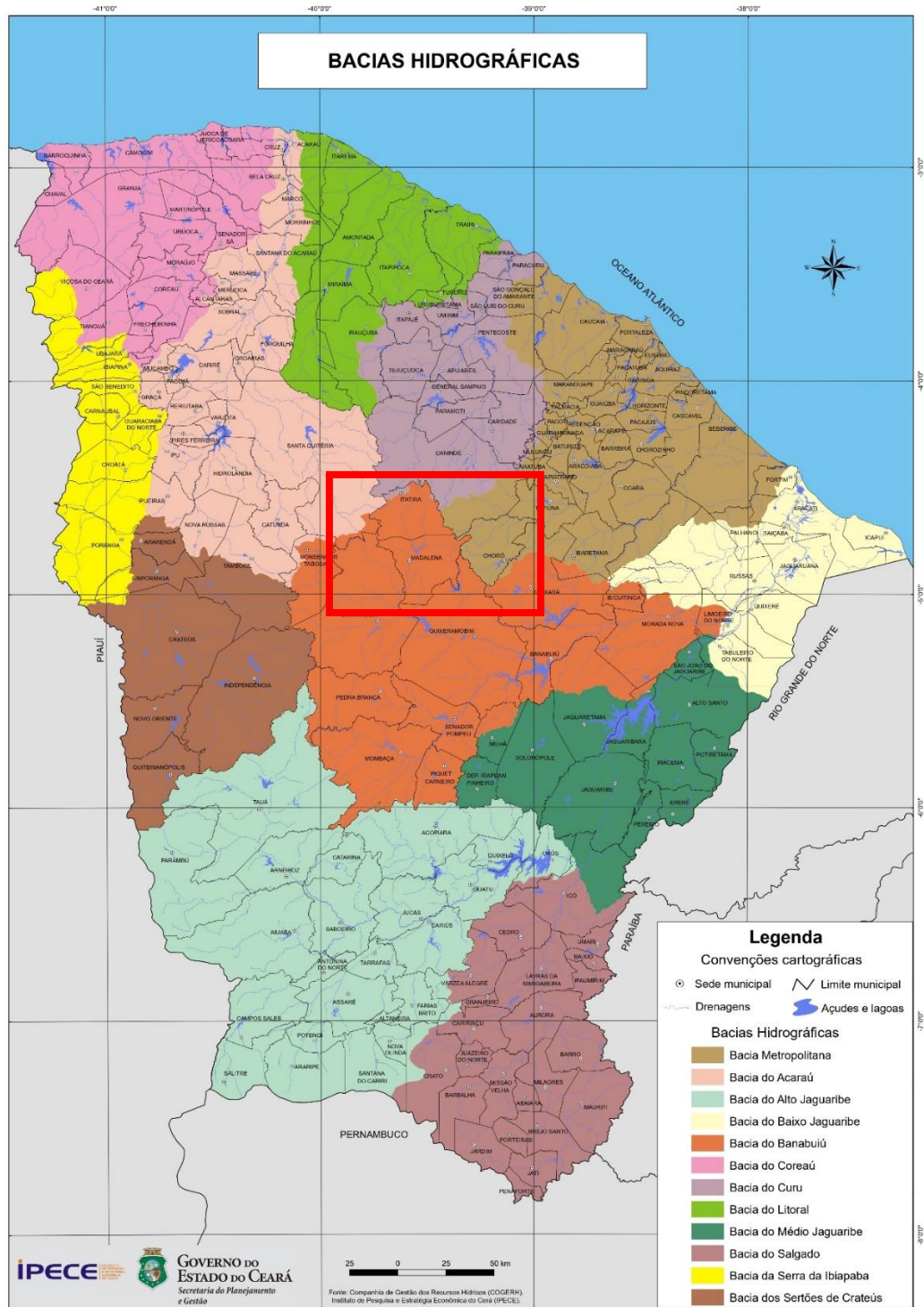
O relevo da cidade é formado por maciços residuais e depressões sertanejas. Quanto a pedologia local, os tipos de solo presentes são os solos litólicos, planossolo solódico, podzólico vermelho-amarelo e não cálcico (IPECE, 2017).

Quanto a vegetação, são predominantes a Caatinga Arbustiva Aberta, Caatinga Arbustiva Densa e Floresta Subcaducifólia Tropical Pluvial (IPECE, 2017). A geologia de Canindé, como mostra a Figura 3, é formada predominantemente por terrenos constituídos por rochas metamórficas, como a maior parcela do estado do Ceará. Áreas com predominância de rochas ígneas intrusivas podem ser encontradas na região centro-norte do município.

Figura 3 – Mapa Geológico do Ceará.



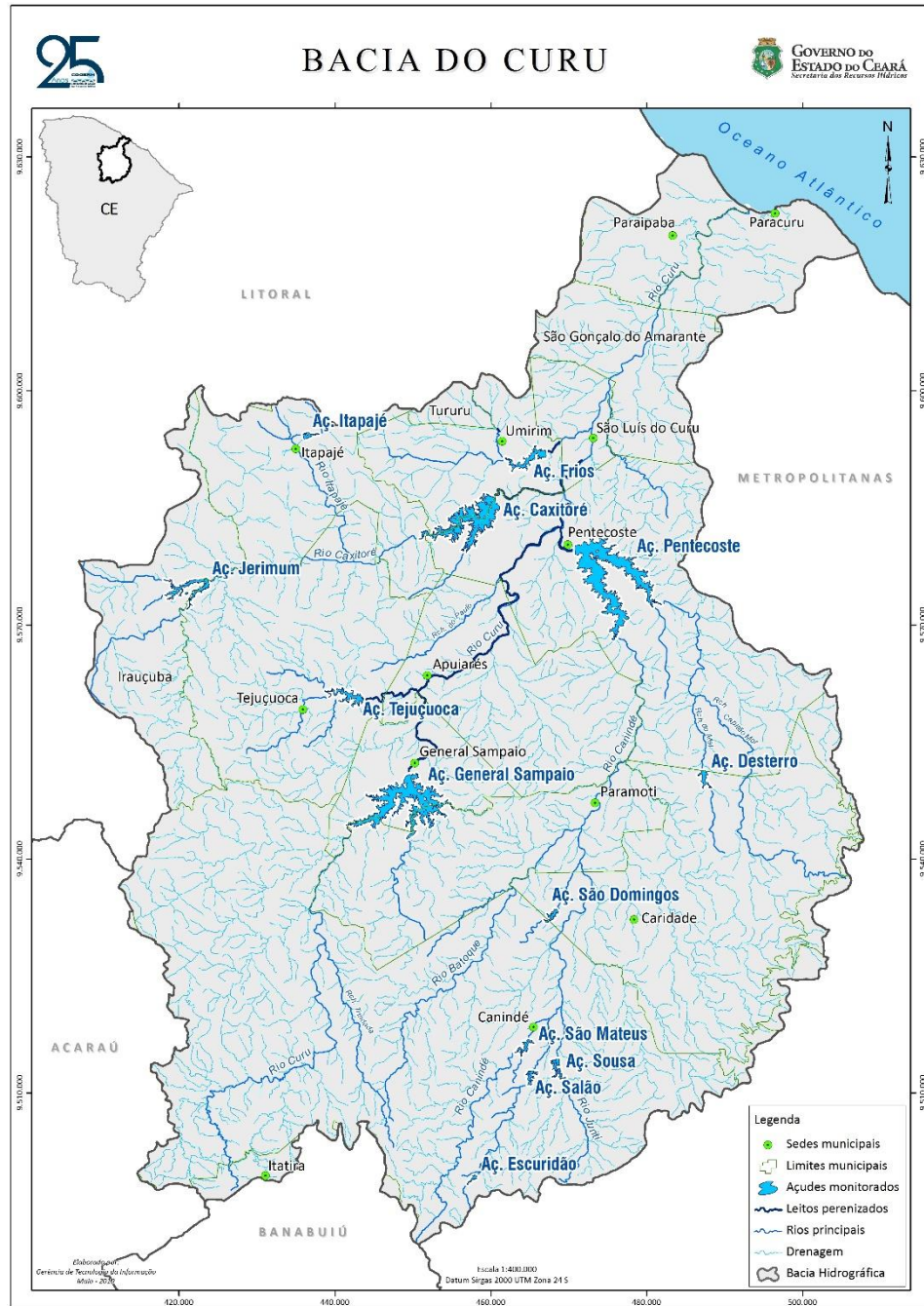
Fonte: IPECE, 2007



Fonte: IPECE, 2007.

Essas bacias abastecem os principais rios da cidade, Canindé, Curu, Choró, Salão, Batoque, Cangati e Juriti.

Figura 6 – Mapas das Bacias Hidrográficas de Canindé.



(a) Bacia do Curu;

Plástico Rígido	7,0
Outros	6,4
Metal	3,3
Borracha	3,0
Tetra Park	2,6
Madeira	2,2
Vidro	2,1

Fonte: Adaptado de Santos e Mota (2009).

Desse modo, considera-se um percentual a ser disposto de aproximadamente 48% de matéria orgânica, 14% de papel/papelão e 9% de plástico.

Não há dados sobre o percentual de coleta dos resíduos pelo serviço de limpeza urbana atuais. Segundo o IBGE, em 2010 cerca de 62% da população era atendida com coleta de lixo no município de Canindé.

3 METODOLOGIA

3.1 Seleção da área

Para seleção da área, o primeiro passo foi o levantamento de dados por imagem de satélite, comparando com dados cartográficos. Seguindo as considerações técnicas da NBR 13.896/97 que dispõe as condições mínimas exigíveis para projeto, implantação e operação aterros de resíduos não perigosos.

Desse modo, as prioridades eram ser distantes de cursos d'água em no mínimo 200 metros, possuir fácil acesso, mesmo em períodos chuvosos, ser distante de núcleos populacionais pelo menos 500 metros e uma área com baixa declividade. Além disso, deve possuir um baixo potencial para geração de impactos ambientais com baixos custos de instalação e operação do aterro (ABNT, 1997).

3.2 Construção e operação do aterro sanitário

3.2.1 Estimativa de volume e população

O aterro será projetado para ter uma vida útil de 15 anos, do período de 2018 a 2033. Para o cálculo de estimativa de volume, realizado através da Equação 1, foram adotados os dados da Tabela 6, como população, massa e peso específicos e geração per capita de resíduos (RECESA, 2008).

$$G_t = \{P_0(1 + Y_p)^t\} \{G_{po}(1 + Y_{per})^t\} \{C_t\} \quad (1)$$

Onde:

G_t = geração futura de resíduos, após t anos (Kg/d);

G_o = geração atual de resíduos (Kg/d);

P_o = população atual do total do município (hab);

G_{po} = geração per capita atual (Kg/hab.d);

C_o = cobertura atual da coleta ou nível de atendimento dos serviços de coleta (%);

C_t = nível de cobertura da coleta no tempo t considerado (%);

Y_p = taxa de crescimento populacional (% a.a.);

Y_{per} = taxa de incremento anual da geração per capita (% a.a.);

t = tempo considerado (anos).

Tabela 6 – Dados para a estimativa de volume.

DADOS DE ENTRADA				
População	2010	Total	74.473	hab
		Urbana	46.875	hab
Taxa de crescimento pop. Anual	2010	Urbana	1,71	%
Geração per capita de resíduos	2018	Urbana	54,39	t/ano
			1,01	kg/hab*d
Taxa de crescimento de Resíduos		Urbana	1	%
Peso Específico			0,7	t/m ³
Massa Específica			700	kg/m ³
Dias úteis – aterro	Corresponde a 1 ano		313	dias

Fonte: Elaborada pela autora.

A estimativa populacional é calculada pela Equação 2 (RECESA, 2008).

$$P_n = P_{n-1} \left(1 + \frac{Tx_{pop}}{100} \right)^{n-(n-1)} \quad (2)$$

Onde:

P_n = População do ano (hab)

P_{n-1} = População do ano anterior (hab)

Tx_{pop} = Taxa de crescimento populacional anual (%)

n = Ano

3.2.2 Método construtivo

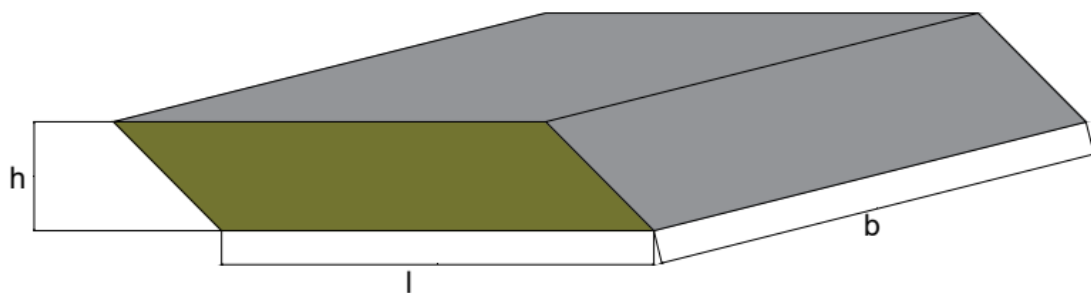
O método construtivo adotado será o de rampa, pois mesmo que o terreno não seja tão acidentado, opta-se pelo aproveitamento do solo escavado para cobertura. Assim, será construído abaixo e acima do solo, com profundidades de 2,3 metros cada célula total. Cada camada de cobertura terá 0,3 metros de espessura.

Primeiramente deve-se escavar até uma profundidade de 3,5 metros, preparar o fundo do aterro para o resíduo e, por fim, começar o processo de disposição dos resíduos, despejando-os no pé da rampa de proporção 1:1. Em seguida, espalha-se os resíduos em

camadas mais finas e baixas. Finalmente, passando o trator de 3 a 5 vezes, a camada de resíduos será compactada. A cobertura de cada célula possui 0,3 metros de espessura de argila compactada.

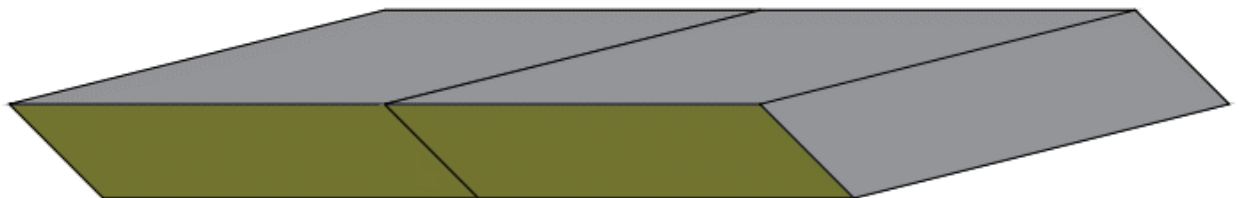
O formato-modelo de cada célula está representado na Figura 7, em que 'b' é a frente de operação, 'l' é a largura da célula e 'h' é a altura, ou profundidade. A Figura 8 representa o agrupamento das células.

Figura 7 – Modelo da célula padrão.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 8 – Posicionamento das células padrão.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.3 Dimensionamento das células totais

O aterro possui uma célula total inferior com profundidade de 2,3 metros abaixo do solo, com dimensões principais de 480m x 240m, com uma área de 11,52 ha. O aterro possui proporções de talude da rampa de trabalho de 1:1. A célula superior possui altura de 2,3 metros acima do solo, com as mesmas proporções de talude. Sua maior dimensão de área, a área inferior, corresponde à área superior da célula sob ela.

3.2.4 Revestimento de fundo

O revestimento de fundo do aterro é formado por 1,5 metros de solo impermeável; 0,6 metro de camada impermeável de argila compactada com coeficiente de permeabilidade $K = 10^{-9}$ m/s; Geomembrana PEAD com espessura de 2mm; Camada de proteção com geotêxtil Bidim; Camada drenante com dreno cego retangular de 0,3 metro; Camada de separação e filtração de 0,26 metro.

Para garantir que a fixação da geomembrana e evitar a entrada de líquidos e a ação dos ventos, é necessária sua ancoragem a superfície superior dos taludes. Para isso, é escavada uma calha imediatamente após a área do aterro onde a geomembrana é coberta pelo próprio solo da escavação e compactado ou mesmo com concreto, ambos de forma que não danifique a lona de impermeabilização (RECESA, 2008). Este projeto considera uma escavação de 0,3m x 0,3m para a realização da ancoragem.

3.2.5 Dimensionamento dos drenos e lixiviado

O dreno utilizado é o dreno cego retangular, com sistema de drenagem de percolado do tipo espinha de peixe, que, mesmo não sendo o mais eficiente, possui o melhor custo benefício e é o mais adotado em projetos desse tipo (RECESA, 2008). A brita utilizada foi a brita nº3 (38-50 mm) de coeficiente K de 0,45. A seção transversal do dreno possui área de 0,107 m².

A vazão média de lixiviado é calculada pelo método suíço, utilizado principalmente quando o aterro possui menor porte e quando há escassez de dados, de acordo com a equação 3 (RECESA, 2008).

$$Q = \frac{1}{t} * P * A * K \quad (3)$$

Onde:

Q = vazão média do lixiviado (L/s);

P = precipitação média anual (mm);

A = área do aterro (m²);

t = número de segundos em um ano (s);

K = coeficiente que depende do grau de compactação dos resíduos, com valores recomendados a partir da observação experimental. (Foi utilizado coeficiente $K = 0.35$)

Para determinar as dimensões dos drenos, foi calculado a área de contribuição do aterro para o dreno através da Equação 4 que segue a lei de Darcy (RECESA, 2008).

$$A = \frac{Q}{K \cdot i} \quad (4)$$

Onde:

A = área de contribuição do aterro para o dreno considerado (m²).

Q = a vazão de projeto para a seção do dreno de lixiviado considerada (m³/s);

K = coeficiente de permeabilidade do meio drenante (brita) (m/s);

i = gradiente hidráulico, que pode ser aproximado pela declividade do dreno no trecho considerado (m/m);

Ao definir a base do dreno L como 0,4 m, as alturas dos drenos são calculadas através da razão da área de contribuição do aterro para o dreno (A) e sua base L.

O espaçamento entre os drenos é calculado de forma que o lixiviado não alcance a altura máxima (h_{max}) adotada e exigida pela NBR 13.896 (ABNT, 1997) de 30 cm. A Equação 5 é utilizada para o cálculo de espaçamento dos drenos, considerando o ângulo de declividade dos drenos de 2% (RECESA, 2008).

$$L = \frac{2h_{\max}}{c^2 \left[\frac{1}{c} (\tan^2 \emptyset) + 1 - \left(\frac{\tan \emptyset}{c} \right) (\tan^2 \emptyset + c)^{\frac{1}{2}} \right]} \quad (5)$$

Onde:

L = espaçamento entre drenos de lixiviados;

h_{max} = altura máxima da lâmina de lixiviado entre drenos adjacentes;

∅ = ângulo de declividade entre drenos;

c = q/k;

q = intensidade de infiltração/percolação (ou vazão específica);

k = condutividade hidráulica (permeabilidade) dos RSU compactados. O valor varia entre 10⁻³ a 10⁻⁴ cm/s para aterros no Brasil.

Foi adotado um coeficiente de condutividade hidráulica de 10⁻³ cm/s. O coeficiente q de intensidade de infiltração foi calculado pela razão da vazão do lixiviado (Q) e a área do aterro (A).

3.2.6 Dimensionamento da lagoa de lixiviados

Para dimensionar a lagoa de lixiviados, deve-se definir o tempo de armazenamento do efluente na lagoa. Para esse projeto, foi adotado o intervalo de 7 dias. Deve-se considerar uma borda livre de no máximo 0,5 m. O volume é calculado através da Equação 6.

$$V = \left(\frac{h}{3}\right) (a + \sqrt{A * a} + A) \quad (6)$$

Onde:

V= volume da lagoa de armazenamento de lixiviado;

h= altura máxima da lâmina de lixiviado;

a = área da base menor;

A = área da base maior.

3.2.7 Cobertura final do aterro sanitário

A cobertura final, localizada logo acima dos resíduos, é composta por: uma camada de regularização de tamanho variável, pois depende do nivelamento dos resíduos; uma camada de drenagem de gás de 20 cm de espessura composta por areia; uma camada impermeabilizante de argila compactada de 40 cm de espessura; por uma geomembrana de PVC de 0,8 mm; camada de proteção de geotêxtil de 150g/m² acoplado de 2mm de espessura; camada de drenagem de águas pluviais de 30 cm de espessura de areia; camada de separação e filtração de 20 cm de espessura; e por fim o solo de cultivo, de 0,4 metro (ABNT, 1997; CEMPRE, 2018).

3.2.8 Sistema de drenagem de gases

De acordo com a norma NBR 15.849 de 2010, a adoção ou dispensa do sistema de drenagem é baseado nos critérios definidos da Tabela 7.

Tabela 7 – Instruções para a consideração do sistema de drenagem dos gases.

Características da operação		Altura final do aterro (m)	
		≤ 3	> 3
Fração orgânica dos resíduos (%)	≤ 30	Dispensar	Dispensar
	> 30	Dispensar	Considerar

Fonte: Adaptado ABNT (2010)

Desse modo, como o aterro possui fração orgânica de resíduos acima de 30% (47.5%), e possui altura final de 4,6m, maior que 3m, deve-se considerar o sistema de drenagem. Os drenos serão interligados ao sistema de drenagem do líquido percolado.

A NBR 15.849 (ABNT, 2010) determina ainda que os drenos devem ser verticais e conectados a drenagem de lixiviados. A norma determina ainda que o espaçamento máximo de entre os drenos é de 30 metros. O espaçamento entre cada dreno é definido pela Equação 6 (RECESA, 2008).

$$x = 2R \cos 30^{\circ} \quad (6)$$

Onde:

x = espaçamento entre os drenos;

R = raio de influência (pode variar de 15 a 30 metros).

A disposição dos drenos deve ser calculada pelo projetista de forma a coincidir com a drenagem de lixiviados e o espaçamento calculado.

3.2.9 Sistema de drenagem de águas pluviais

O sistema de drenagem de águas pluviais será do tipo colchões Reno, constituídos de pedras encontradas na obra, de espessura de 85mm. Sua seção possui largura fixa de 2m e espessura de 0,17m. Sob o colchão, é instalado uma geomembrana do tipo PEAD, de 2mm, para evitar que o sistema tenha contato direto com o solo do aterro.

Por todo o perímetro do aterro devem ter canaletas de concreto que irão captar e transportar as águas superficiais.

3.3 Estabilidade dos taludes

As análises de estabilidade geomecânica do aterro de resíduos sólidos foram realizadas através do programa computacional Slide 6.0 da Rocscience, utilizando a licença da Universidade Federal do Ceará (UFC). Os dados de entrada necessários para a modelagem estão na Tabela 7.

Como há grande variabilidade (espacial e temporal) dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de aterros de resíduos sólidos ocasionada principalmente por processos de biodegradação, as situações indicadas visam simular diversas condições que o aterro pode estar

submetido ao longo da sua vida útil e após seu encerramento. Os valores de coesão, ângulo de atrito e peso específico indicados na Tabela 8 podem ser considerados representativos, pois apresentam valores em intervalos estatísticos estudados em mais de 80 trabalhos técnicos da literatura, conforme indicado por Norberto *et al.* (2020).

Tabela 8 – Situações de materiais analisados de acordo com os parâmetros de entrada.

	SITUAÇÃO 1	SITUAÇÃO 2	SITUAÇÃO 3	SITUAÇÃO 4
COESÃO	10 KPa	10 KPa	5 KPa	5 KPa
ÂNGULO DE ATRITO	20°	20°	17°	17°
PESO ESPECÍFICO	5,5 KN/m ³	10 KN/m ³	5,5 KN/m ³	10 KN/m ³

Fonte: adaptado de Norberto *et al.* (2020)

O modelo de resistência ao cisalhamento do material utilizado foi o de Mohr-Coulomb, e o método de estabilidade de taludes para as estimativas de fator de segurança foi o de Bishop Simplificado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

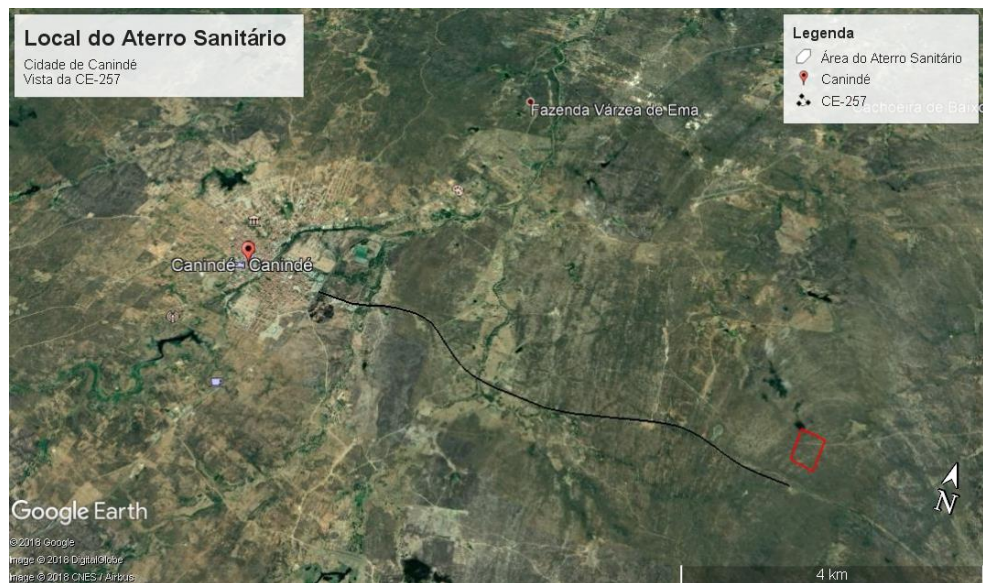
4.1 Seleção da área

A área escolhida está localizada a 200 metros da CE-257, que conecta Canindé a Aratuba. O local está a 7,9 quilômetros da saída da cidade e 9,2 quilômetros do seu ponto central, na CE-257. Possui um curso d'água a nordeste, com distância de 2 km. Á noroeste, possui um açude particular, a 1,1 km de distância. As moradias mais próximas estão a 1,7 km e 2,2 km, em que são encontradas 18 residências próximas ao açude.

Foi adotado que o solo de fundação da área possui 5 metros de solo insaturado, lençol freático a 7 metros de profundidade e perfil argilo-arenoso. Sua área reservada é de 11,52 ha, com aproximadamente 480 metros de comprimento e 240 de largura, em profundidade de 2,3 metros. Já considerando a área da lagoa, a área total é de 11,554 ha. A declividade do terreno é de 1,7%, do sentido leste-oeste, com diferença máxima da cota de 10 metros.

Os baixos índices demográficos foi outro ponto positivo, pois existem poucos vilarejos na área, se comparado às demais vias. Além disso, nenhum dos cursos d'água principais do município estão próximos do local escolhido. Vale ressaltar que o Lixão municipal está localizado a 6 km da cidade, seguindo na mesma via em questão.

Figura 9 – Local previsto para o Aterro Sanitário de Canindé.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 Construção e operação do aterro

4.2.1 Estimativa de Volume e População

O dimensionamento do volume total de resíduos que serão dispostos no aterro está na Tabela 9, a estimativa da população urbana, em 2018, é de 63.605 habitantes, e, com previsão para os 15 anos de funcionamento, em 2033 terá aproximadamente 82.025 habitantes, para um volume total de 440 mil metros cúbicos de resíduos.

Tabela 9 – Estimativa de população e Volume.

Ano		População hab	Geração <i>per capita</i> (kg/hab*d)	Cobertura da coleta %	Massa kg/d	Volume de resíduos compactados no aterro		
						m ³ /dia	m ³ /ano	Acumulado
2018	0	63.604,39	1,01	50%	32120,21	45,89	14362,32	14.362,32
2019	1	64.692,02	1,0201	50%	32996,16	47,14	14754,00	29.16,32
2020	2	65.798,25	1,030301	50%	33896,00	48,42	15156,36	44.272,68
2021	3	66.923,40	1,04060401	50%	34820,38	49,74	15569,68	59.842,36
2022	4	68.067,79	1,05101005	50%	35769,97	51,10	15994,29	75.836,65
2023	5	69.231,75	1,061520151	50%	36745,45	52,49	16430,47	92.267,12
2024	6	70.415,62	1,072135352	50%	37747,54	53,93	16878,54	109.145,66
2025	7	71.619,72	1,082856706	50%	38776,95	55,40	17338,84	126.484,49
2026	8	72.844,42	1,093685273	100%	79668,87	113,81	35623,37	162.107,86
2027	9	74.090,06	1,104622125	100%	81841,52	116,92	36594,85	198.702,71
2028	10	75.357,00	1,115668347	100%	84073,42	120,10	37592,83	236.295,54
2029	11	76.645,60	1,12682503	100%	86366,19	123,38	38618,02	274.913,56
2030	12	77.956,24	1,13809328	100%	88721,48	126,74	39671,18	314.584,74
2031	13	79.289,30	1,149474213	100%	91141,00	130,20	40753,05	355.337,78
2032	14	80.645,14	1,160968955	100%	93626,51	133,75	41864,42	397.202,21
2033	15	82.024,18	1,172578645	100%	96179,80	137,40	43006,11	440.208,32
							Volume Total (m ³)	440.208,32

Volume + material de cobertura	506.239,57
--	-------------------

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.2 Método Construtivo

As dimensões das células padrão baseadas no volume médio diário de cada ano de funcionamento do aterro estão representadas na Tabela 10.

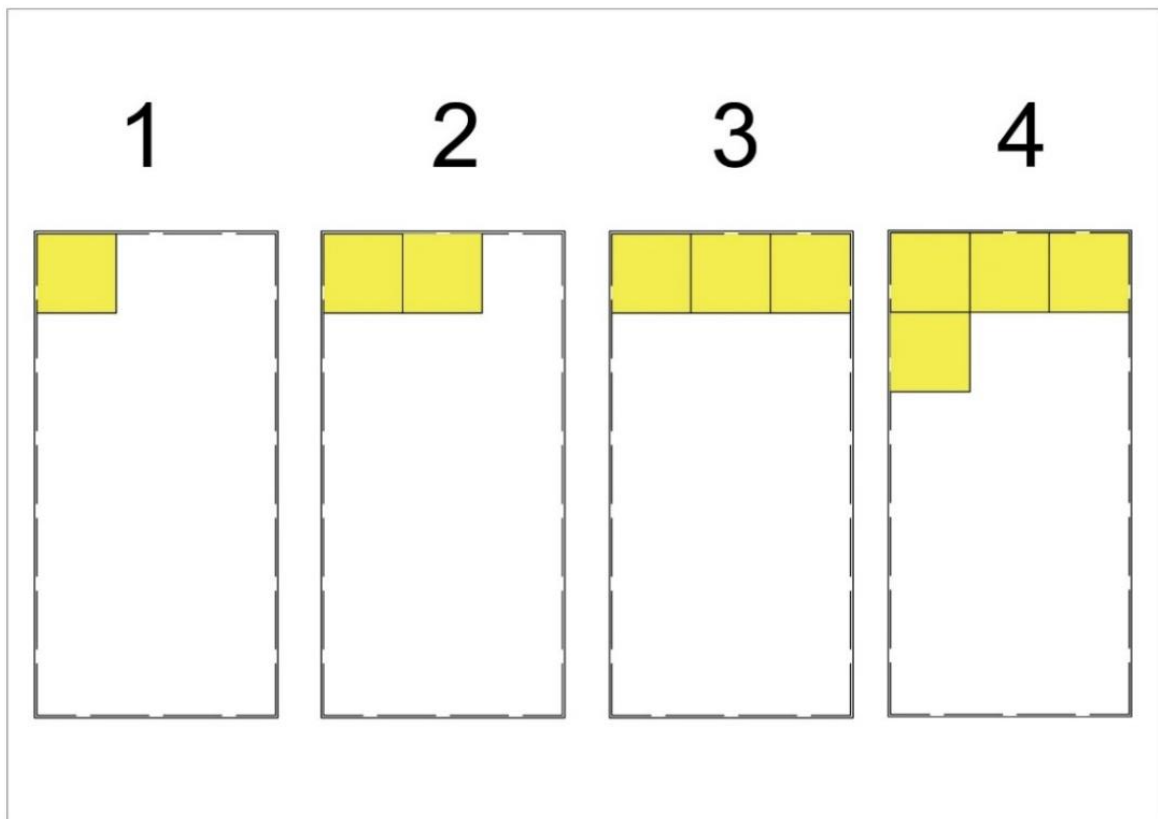
Tabela 10 – Estimativa das dimensões das células padrão do aterro.

Ano		Volume diário médio do ano (V)	Altura da Célula (h)	Frente de op. e largura (l=b)
		m ³ /d	m	m
2018	0	45,89	2,05466761	4,725735504
2019	1	47,14	2,073177965	4,768309319
2020	2	48,42	2,091855077	4,811266678
2021	3	49,74	2,110700451	4,854611037
2022	4	51,10	2,129715601	4,898345882
2023	5	52,49	2,148902057	4,942474731
2024	6	53,93	2,168261363	4,987001134
2025	7	55,40	2,187795075	5,031928673
2026	8	113,81	2,781281721	6,396947959
2027	9	116,92	2,80633809	6,454577608
2028	10	120,10	2,83162019	6,512726438
2029	11	123,38	2,857130055	6,571399127
2030	12	126,74	2,882869736	6,630600394
2031	13	130,20	2,908841305	6,690335001
2032	14	133,75	2,935046849	6,750607753
2033	15	137,40	2,961488477	6,811423497

Fonte: Elaborado pela autora.

As células serão construídas primeiramente no menor comprimento da área, seguindo desse modo o maior comprimento no decorrer da execução. O mesmo ocorre para a célula total superior. A Figura 10 representa a sequência de construção das células padrão calculadas.

Figura 10 - Sequência de construção das células padrão do Aterro Sanitário.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.3 Dimensionamento das células totais

As duas células totais, inferior e superior ao solo, tem suas dimensões expostas na Tabela 11.

Tabela 11 – Dimensões das Células Totais Inferior e Superior.

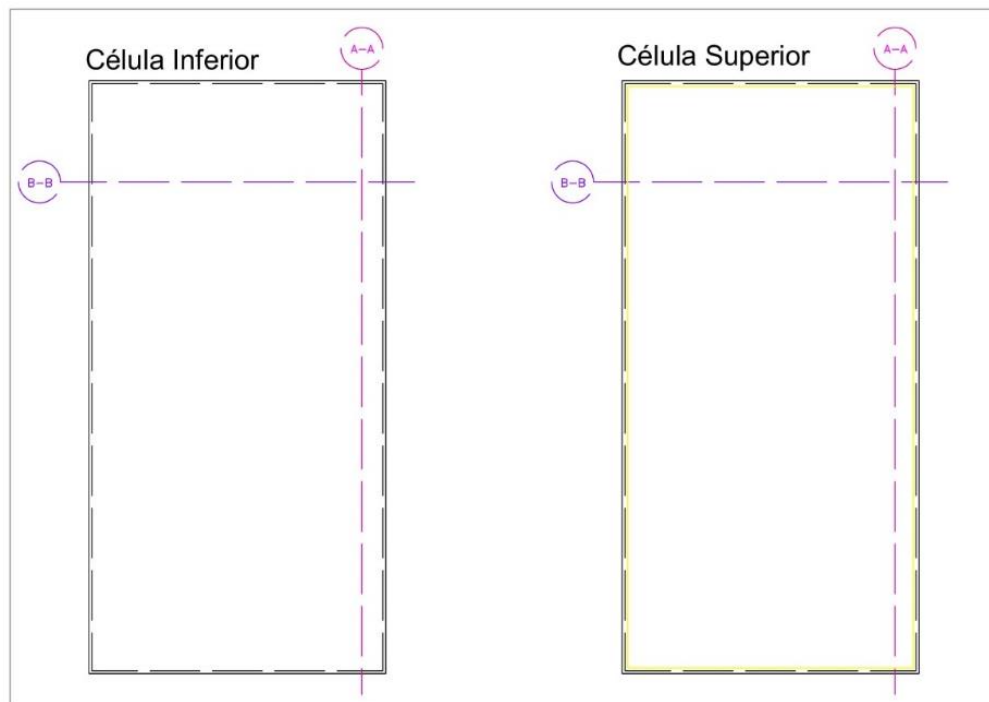
Dimensões das Células Totais		
Célula Inferior	PROFUNDIDADE	h= 2,3 m

	COMPRIMENTO	L= 480 m	l= 480 m
	LARGURA	B= 240 m	b= 240 m
Célula Superior	PROFUNDIDADE	h= 2,3 m	
	COMPRIMENTO	L= 475,4 m	l= 471 m
	LARGURA	B= 235,4 m	b= 231 m

Fonte: Elaborado pela autora.

A representação com vista superior da área do aterro, com cortes A-A em comprimento e B-B em largura, estão na Figura 11, assim como a representação da vista longitudinal no corte A-A (Figura 12) e da vista transversal no corte B-B (Figura 13) das células na área no aterro.

Figura 11 – Vista superior das Células Totais.



Fonte: Elaborado pela autora.

a) *Célula Inferior*, em que a linha branca tracejada representa a área inferior da célula. b) *Vista do aterro com a célula superior*, representada pela linha tracejada amarela.

Figura 12 – Vista longitudinal das Células Totais no corte A-A.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 13 – Corte B-B com a vista Transversal das Células Totais.

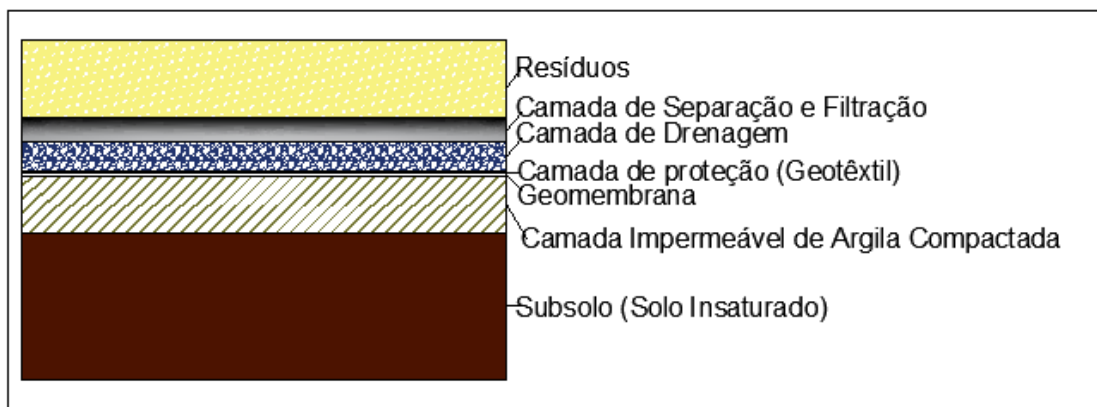


Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.4 Revestimento de fundo

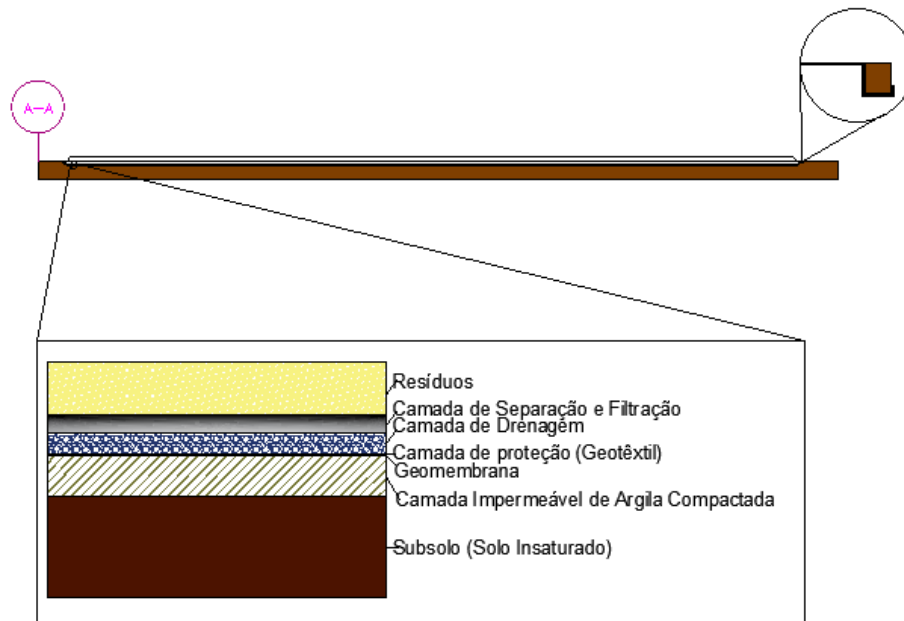
A representação da camada de revestimento de fundo descrito está na Figura 14, assim como a vista do aterro com os detalhes de revestimento de fundo (Figura 15 e 16) e a ancoragem da geomembrana (Figura 17).

Figura 14 – Revestimento de Fundo do Aterro Sanitário.



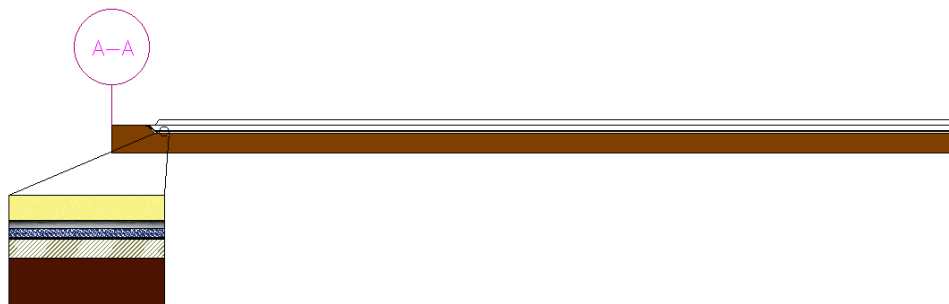
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 15 – Corte A-A com descrição das camadas do revestimento de fundo.



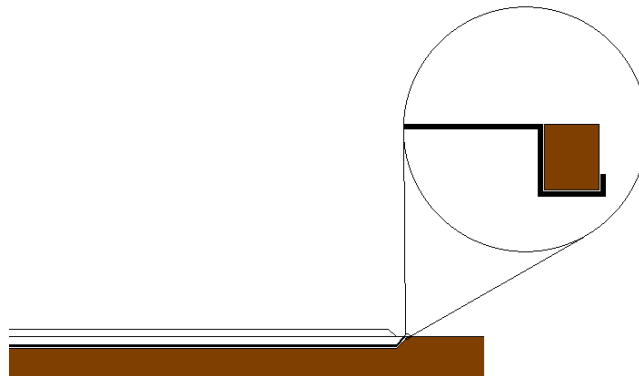
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 16 – Corte A-A com detalhes do revestimento de fundo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 17 – Corte com a ancoragem da geomembrana.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.5 Dimensionamento dos drenos e lixiviado

O primeiro passo para o dimensionamento do sistema de drenagem de lixiviados é o cálculo da vazão média do lixiviado pelo método suíço. Seus dados e entrada e resultado estão na Tabela 12.

Tabela 12 – Cálculo da vazão média do lixiviado.

Método Suíço		
Precipitação Média Anual	P=	756,1 mm
Área do Aterro	A=	115.200,0 m ²
Número de segundos em um ano	t=	31.536.000,0 s
Coeficiente k	k=	0,35
Vazão Média do Lixiviado	Q=	0,9667032 l/s
	Q=	0,0009667 m ³ /s

Fonte: Elaborado pela autora.

Assim, a vazão média de lixiviado é de 0,96 L/s e declividade do dreno de 2%. Com isso, foi possível calcular a área de contribuição do aterro para o dreno como na Tabela 13.

Tabela 13 – Cálculo da área de contribuição do aterro para o dreno.

Pela Lei de Darcy		
Gradiente Hidráulico para Brita nº3	i=	0,02 mm
Área de contribuição do aterro para o dreno	A=	0,1074115 m ²
Vazão do Lixiviado	Q=	0,0009667
Coeficiente de Permeabilidade do Meio Drenante	K=	0,45 m/s

Fonte: Elaborado pela autora.

A base do dreno cego retangular adotado é de 0,4 metro, e, utilizando a área encontrada, é possível calcular a altura do dreno, que também corresponde a altura máxima da lâmina de lixiviados (Tabela 14).

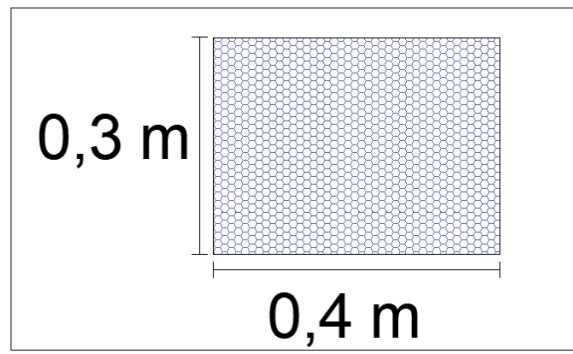
Tabela 14 – Cálculo da altura do dreno cego retangular.

Dimensões - Dreno cego retangular			
Base do Dreno	L=	0,4	m
Altura do Dreno	B=	0,2685287	m
Altura do Dreno adotado	B=	0,3	m

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, o dreno cego possui 0,3 metro de altura e 0,4 metro de largura. Seu corte transversal está representado na Figura 18.

Figura 18 – Seção Transversal do Dreno Cego Retangular



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 15 apresenta os valores para o cálculo do espaçamento dos drenos e seu resultado.

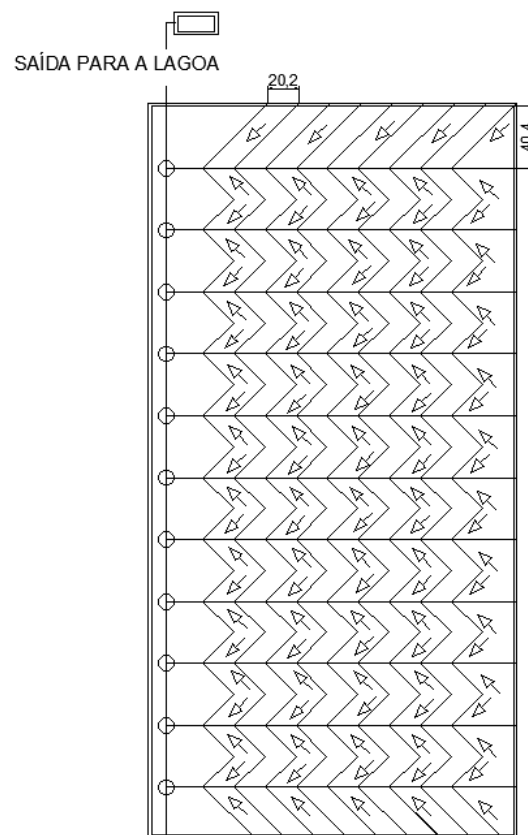
Tabela 15 – Cálculo do espaçamento dos drenos.

Espaçamento dos Drenos			
Espaçamento entre Drenos de Lixiviado	L=	40,4	m
Altura Máxima da Lâmina de Lixiviados	hmax=	0,3	m
Ângulo de declividade entre drenos		5	0,087489
Intensidade de infiltração	q=	8,392E ⁻⁰⁹	m/s
Condutividade hidráulica dos RSU	k=	0,00001	m/s
C	q/k=	0,0008392	

Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 19 representa todo o sistema de drenagem do aterro do tipo espinha de peixe. Na parte superior está localizada a Lagoa de Lixiviados. O espaçamento entre os drenos principais é de 40,4 metros, e dos demais é de 20,2 metros.

Figura 19 – Sistema de Drenagem de lixiviados.



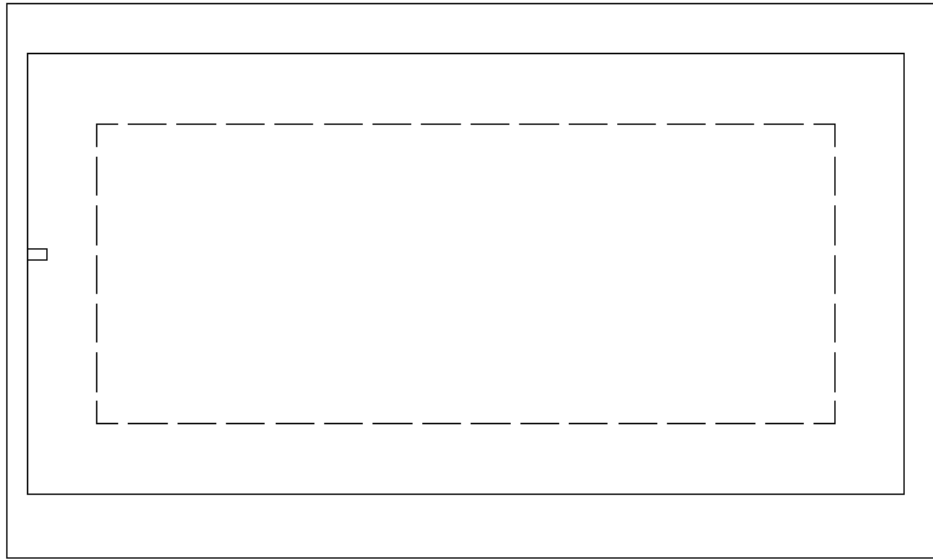
Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.6 Dimensionamento da lagoa de lixiviados

A lagoa possui as dimensões de 29,0m x 14,5m, com tempo de armazenamento de lixiviados de 7 dias. A lagoa foi projetada com volume de 623,14 m³ e área de 420,5 m², profundidade de 2,3 metros, com borda livre de 0,5 metro. A lagoa possui alimentação superior no ponto central da menor dimensão de comprimento.

A lagoa de lixiviados está representada na Figura 20, assim como sua entrada de alimentação de lixiviado.

Figura 20 – Lagoa de lixiviados.

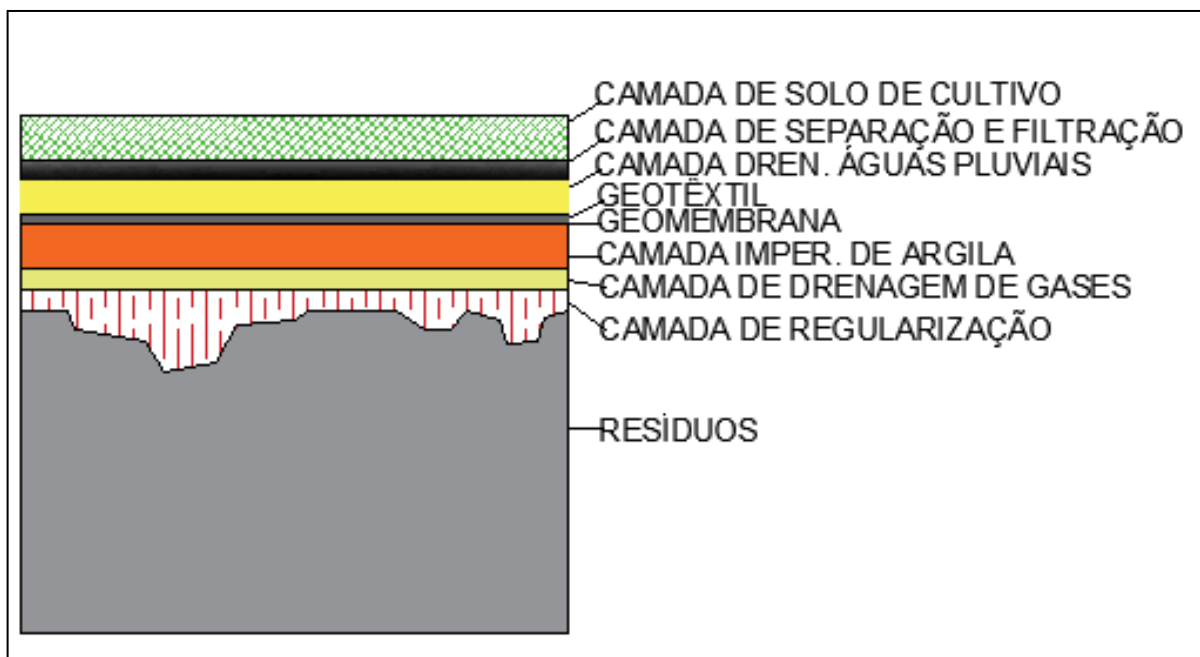


Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.7 Cobertura final do aterro sanitário

A Figura 21 está ilustrando a camada de cobertura do aterro.

Figura 21 – Cobertura Final do Aterro Sanitário.

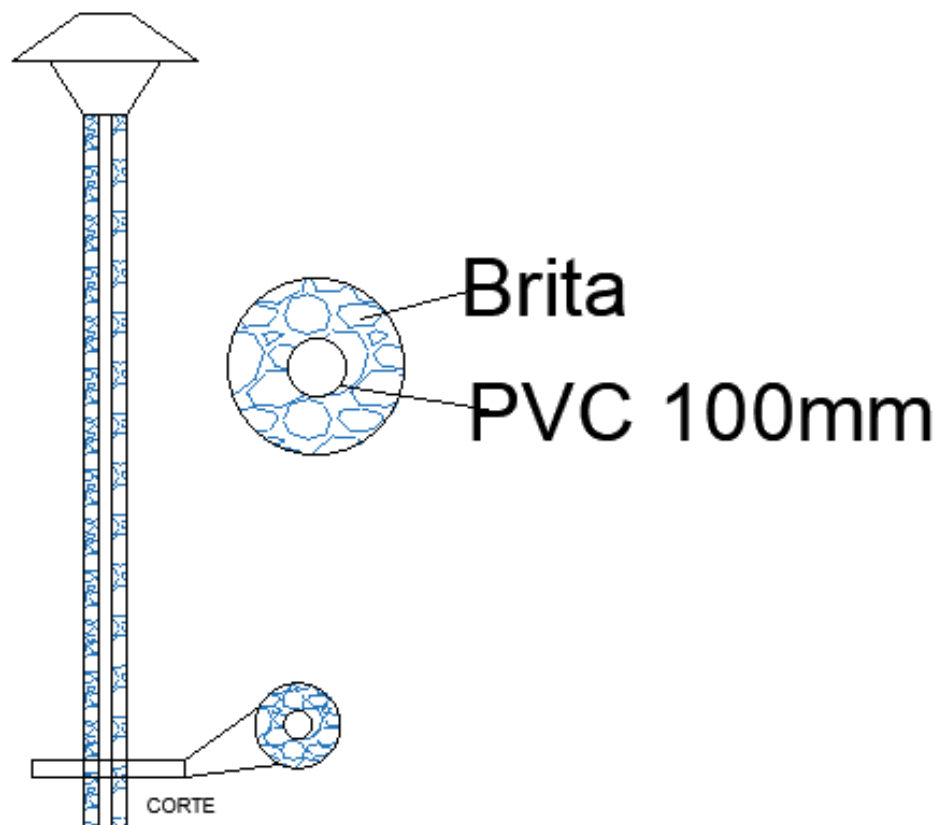


Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.8 Sistema de drenagem de gases

Formado por tubos de PVC de 100mm e revestido por uma camisa de brita de 0,1 metro de diâmetro, o dreno irá desde a base da camada de resíduos até a camada de cobertura final e pôr fim à superfície, formando uma “chaminé”. O dreno está representado na Figura 22.

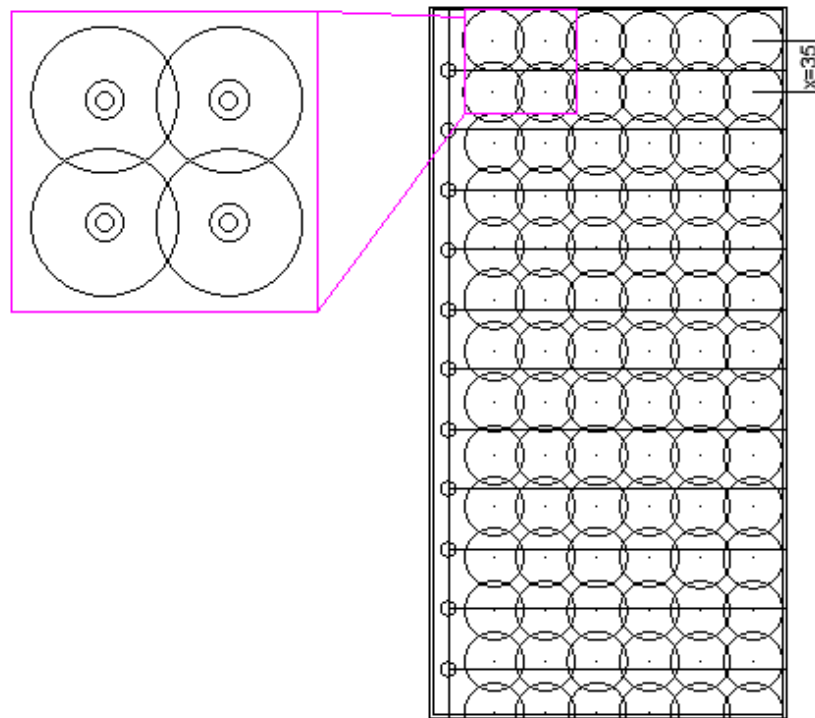
Figura 22 – Dreno de gás.



Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com a NBR 15.849 de 2010, o raio de influência entre os tubos é de 15 a 30 m, assim, adota-se um raio de 20 metros para cada dreno. O sistema de drenagem de gases é formado por 84 drenos. Esses drenos estão agrupados por toda a área do aterro e dispostos com espaçamento de 35 metros de distância entre cada tudo de drenagem. A Figura 23 representa o sistema de drenagem de gases descrito.

Figura 23 – Sistema de Drenagem de Gases.

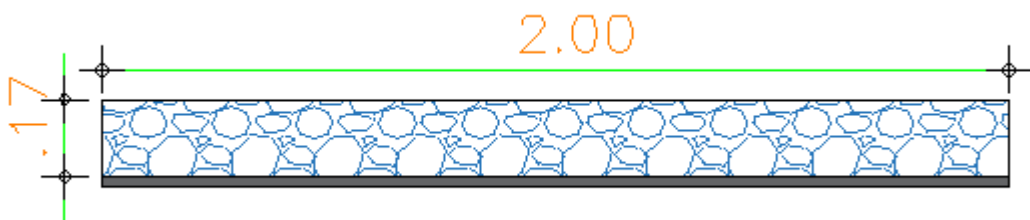


Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.9 Sistema de drenagem de águas pluviais

O sistema de drenagem de águas pluviais é do tipo colchão reno formado por uma camada impermeabilizante de geomembrana PEAD e uma camada de pedras de 1,7 metros de altura por 2,0 metros de largura, como mostra a Figura 24 com o corte transversal do colchão reno.

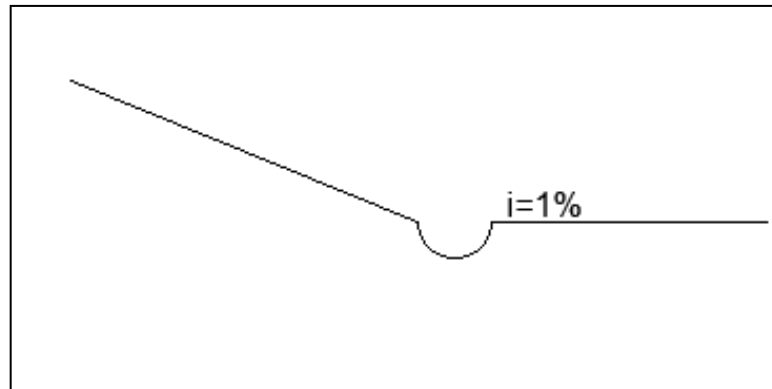
Figura 24 – Colchão Reno.



Fonte: Elaborado pela autora.

As canaletas de concreto serão do tipo meia-cana, com 0,3 metro de raio, como na Figura 25.

Figura 25 – Canaleta de concreto.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.3 Estabilidade dos taludes

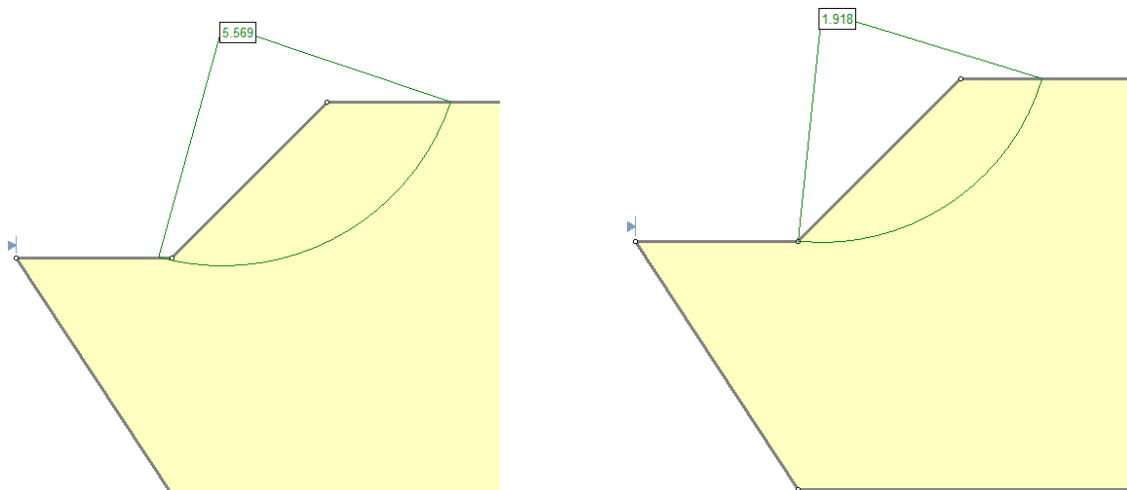
De acordo com as análises, e como mostra a Tabela 16, tem-se que todas as situações estão com fator de segurança acima de 1,5, considerado o valor mínimo necessário para reduzir riscos de ruptura do talude. A situação 1 possui maior fator de segurança, de 5,569, e a situação 4 possui o menor Fator de segurança, de 1,918 (Figura 26).

Tabela 16 – Situações de materiais analisados de acordo com o fator de segurança.

	SITUAÇÃO 1	SITUAÇÃO 2	SITUAÇÃO 3	SITUAÇÃO 4
FATOR DE SEGURANÇA	5,57	3,35	3,00	1,92

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 26 – Análise de estabilidade do terreno.



Fonte: Elaborado pela autora.

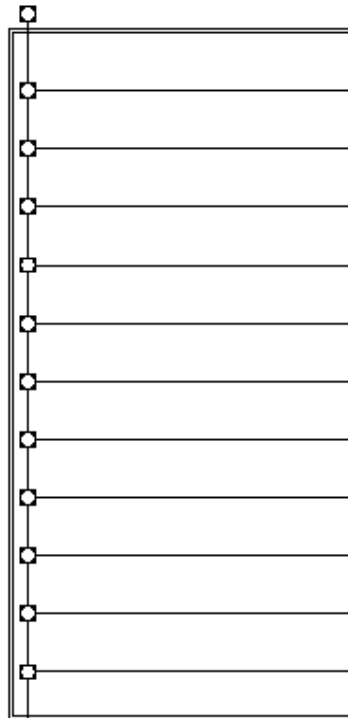
(a) Situação 1- FS = 5,57; (b) Situação 4- FS = 1,92.

4.4 Monitoramento do aterro sanitário

4.4.1 Monitoramento dos líquidos (lixiviados, águas superficiais e subsuperficiais)

O monitoramento dos lixiviados ocorre através das caixas de inspeção, localizadas na saída dos drenos do aterro. Os pontos de monitoramento dos lixiviados estão representados na Figura 27.

Figura 27 – Pontos de Monitoramento dos Lixiviados.



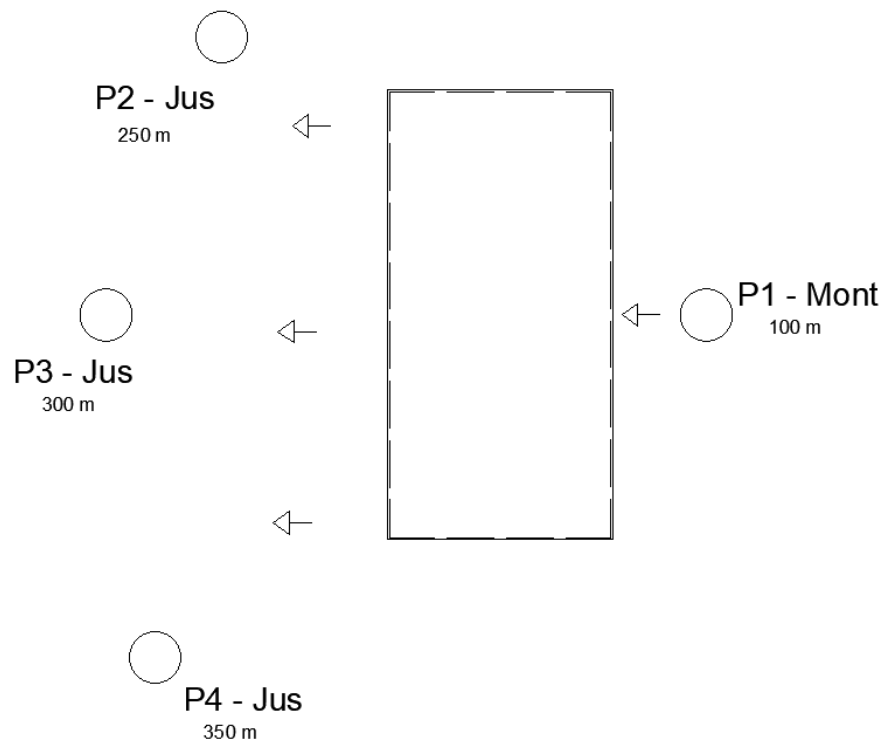
Fonte: Elaborado pela autora.

Serão retiradas amostras do sistema de drenagem de lixiviados a cada 3 meses, por um período de 20 anos após o fechamento do aterro (ABNT, 2010), para analisar em laboratório a sua qualidade e a vazão gerada. A vazão será medida por um medidor de vazão no próprio local.

Quanto ao monitoramento das águas superficiais, deve-se analisar a qualidade das águas que estão a um raio de 1 km do aterro, em pontos a jusante e a montante, com a mesma periodicidade dos lixiviados.

Para as águas subterrâneas, serão retiradas amostras de 4 pontos estratégicos, três a jusante do aterro e um a montante, por meio de piezômetros, considerando o fluxo preferencial do lençol freático. Serão analisadas a cada 6 meses, até 20 anos após o fechamento. Os piezômetros devem estar de acordo com a norma da ABNT NBR 13.895/1997. A Figura 28 representa os pontos de monitoramento, e suas respectivas distâncias do aterro, assim como o sentido do fluxo das águas subterrâneas.

Figura 28 – Pontos de monitoramento de águas subterrâneas – Piezômetros.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.4.2 Monitoramento de gases

A retirada de amostras deve ocorrer a cada 6 meses, e serão medidos no mínimo os parâmetros: CH₄, CO₂, N₂ e O₂. O monitoramento deve ocorrer mesmo após o encerramento, 20 anos após e deve-se atentar na presença de gases combustíveis e potencialmente explosivos.

4.4.3 Monitoramento geotécnico

Devido ao recalque, deve-se realizar monitoramento do deslocamento horizontal, vertical e o comportamento do maciço do aterro além de inspeções visuais, em busca de trincas,

fissuras e erosão na camada de cobertura e no próprio maciço. Essa análise visual deve ocorrer com periodicidade de 1 mês.

O inclinômetro será utilizado para medir o deslocamento horizontal; as placas de recalque, instaladas no interior do aterro, irão medir os recalques por adensamento do aterro e os marcos de superfície, instalados na camada de cobertura final irá medir os recalques e deformações horizontais.

4.5 Encerramento do aterro sanitário

Com previsão de encerramento para 2033, o aterro comportará mais de 440 mil m³ de resíduos. A área do aterro será destinada a atividade de paisagismo, uma vez que área possui distância considerável da cidade, e não há demanda para qualquer área de lazer, o que torna qualquer outra atividade inviável.

Serão plantadas vegetações de pequeno porte nativas da região, para facilitar na prega das mudas, de preferencias vegetação herbácea, como a Vassourinha (*Scoparia Dulcis* L.), Santa Luzia (*Commelina* sp.), Orelha-de-onça (*Macroptilium martii*), Malva rasteira (*Pavonia cancellata*). Esse tipo de vegetação é uma boa opção devido as suas raízes serem curtas e crescerem horizontalmente, não afetando, assim, a camada de cobertura final.

Deve-se monitorar a área a cada 3 meses para remover possíveis plantas que podem prejudicar a estrutura do aterro, e podá-las, caso necessário. O monitoramento do aterro deve ocorrer por no mínimo 20 anos após encerramento. Além disso, as vias de acesso deverão ser mantidas em perfeito estado, com monitoramento há cada 2 anos.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou o projeto de aterro sanitário convencional para resíduos não perigosos de classe II para a cidade de Canindé - Ceará. Foram analisados dados da cidade em questão, como características climatológicas e geotécnicas, assim como a caracterização dos resíduos sólidos, dados populacionais e geográficos.

Foi apresentado detalhadamente as etapas de projeto e instalação do aterro, desde a escolha de área, cálculo de estimativa de população e volume das células ativas e totais, dimensionamento do revestimento de fundo e cobertura final, drenagem subsuperficial, superficial e de gases, lagoa de lixiviados, bem como, cálculo de estabilidade e projeto de monitoramento dos líquidos, gases e de recalques e eventuais problemas que possam ocorrer na camada de cobertura do aterro (fissuras, trincas e erosão).

A área escolhida mostrou-se com estabilidade segura, de acordo com os testes realizados através do programa computacional Slide 6.0 da Rocscience, além disso, os sistemas de drenagem e as camadas de impermeabilização irão minimizar qualquer impacto que poderá ser acarretado ao meio ambiente, assim como o sistema de monitoramento que irá assegurar o bom funcionamento do aterro e garantir a eficiência das camadas impermeabilizantes e as redes de drenagem internas e externas que poderiam causar danos as águas superficiais, subterrâneas e ar.

O monitoramento ocorrerá por 20 anos após o fechamento do aterro, e já estão previstas as atividades para o uso da área após seu encerramento. Este trabalho apontou o dimensionamento de cada sistema constituinte do aterro sanitário e sua relevância de implantação para a cidade de Canindé que precisa de uma disposição final adequada dos resíduos gerados.

Por fim, é reiterada a importância deste tema e a escassez de trabalhos que abordem de forma integral todas as partes e etapas do projeto de aterro sanitário. Assim, fica como sugestão para trabalhos futuros a abordagem de assuntos não tratados nesse trabalho, como o detalhamento do sistema de operação do aterro sanitário, sugestões viáveis para o tratamento do lixiviado, dos líquidos superficiais e dos gases, o levantamento dos custos de implantação e operação do aterro, fator decisivo na escolha de implantação de uma obra desta magnitude para um município de médio porte.

E, para além dessa proposta de disposição, saliento a necessidade de trazer outros objetivos da PNRS para a realidade do município de Canindé, como a introdução de atividades que envolvam a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos

sólidos, um sistema de coleta seletiva e um plano de gerenciamento de resíduos sólidos que envolvam a população e as esferas governantes, assim como o encerramento dos lixões ativos e recuperação das áreas envolvidas.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017**. ed. especial. São Paulo: ABRELPE, 2018, 74 p. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panoram_a_abrelpe_2017.pdf. Acesso em: 17 abr. 2023.

ABREU, Lucas Silva. **Projeto de aterro sanitário em valas para resíduos sólidos urbanos, para a cidade de Barrolândia – TO**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil – Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, 2019.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13895**: Construção de poços de monitoramento e amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15849**: Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 02 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 17 abr. 2023.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico do manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2016**. Brasília: MCIDADES.SNSA, 2018, 188 p.

BORGES, KAROLINE. **O estudo do monitoramento dos impactos pós-implantação do aterro sanitário de Uberlândia/MG**. 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/19899/6/EstudoMonitoramentoImpactos.pdf>. Acesso em: jul de 2023.

CEMPRE - Compromisso Empresarial para Reciclagem. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. 4. ed. São Paulo (SP): CEMPRE, 2018. Disponível em:

https://cempre.org.br/wp-content/uploads/2020/11/6-Lixo_Municipal_2018.pdf. Acesso em: 20 de maio 2023.

COLVERO, Diogo Appel *et al.* Aterro sanitário de Goiânia: uma identidade territorial e a vulnerabilidade e exclusão social da população do seu entorno. **Pesquisa e Tecnologia**, v. 14, n. 2, p. 03-20, 2017.

COGERH – Companhia de Gestão de Recursos Hídricos. Bacia do Curu. 2020. Bases cartográficas. Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/mapas/>. Acesso em: 25 maio 2023.
COGERH – Companhia de Gestão de Recursos Hídricos. Bacias metropolitanas. 2020. Bases cartográficas. Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/mapas/>. Acesso em: 25 maio 2023.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 404, de 11 de novembro de 2008. Estabelece critérios e diretrizes para o licenciamento ambiental de aterro sanitário de pequeno porte de resíduos sólidos urbanos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 220, p. 93, 12 nov. 2008.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. **Diário Oficial do União**: seção 1, Brasília, DF, nº 223, p. 155, 21 nov. 2018. Disponível em: https://www.in.gov.br/web/guest/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895/do1-2018-11-21-resolucao-n-491-de-19-de-novembro-de-2018-51058603. Acesso em: 17 abr. 2023.

DEVADOSS, P.S.; AGAMUTHU, P.; MEHRAN, S.B.; SANTHA, C.; FAUZIAH, S.H. Implications of municipal solid waste management on greenhouse gas emissions in Malaysia and the way forward. **Waste Management**, v. 119, p. 135-144, 2021.

FREIRE, B. V.; SANTOS, A. D. O.; NUNES, A. B. de A. Gestão municipal de resíduos sólidos de Jijoca de Jericoacoara, Brasil/CE. **Revista Aidis de Ingeniería y Ciencias Ambientales**, v. 15, n. 1, p. 18-35, 2022.

HOGLAND, M. *et al.* Remarks on four novel landfill mining case studies in Estonia and Sweden. **Jornal of Material Cycles Waste Management**, v. 20, n. 2, p. 1355-1363, 2017.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Brasileiro de 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

IPECE - Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Bacias Hidrográficas**. 2007. Disponível em: <http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/lista/index.htm>. Acesso em: 21 maio 2023.

IPECE - Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Mapa Geológico Simplificado do Ceará**. 2007. Disponível em: <http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/lista/index.htm>. Acesso em: 21 maio 2023.

IPECE - Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Projeto atlas de divisas municipais georeferenciadas do Estado do Ceará**. 2019. Disponível em: https://www.ipece.ce.gov.br/wpcontent/uploads/sites/45/2019/02/mapas_municipais_Caninde_2019.pdf. Acesso em: 25 maio 2023.

IPECE - Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Perfil Municipal de Canindé**. 2017. Disponível em: https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Caninde_2017.pdf. Acesso em: 21 maio 2023.

ISWA. **Roteiro para encerramento de lixões**. São Paulo: ABRELPE, 2016, 36 p. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/roteiro-para-encerramento-de-lixoes/>.

KORHONEN, J. *et al.* Circular economy: The concept and its limitations. **Ecological Economics**, v. 143, p. 37-46, 2018.

LANER, D. *et al.* Systematic assessment of critical factors for the economic performance of landfill mining in Europe: What drives the economy of landfill mining? **Waste Management**, v. 95, p. 674-686, 2019.

NORBERTO, A. S. Análise estatística da variedade de parâmetros de resistência ao cisalhamento de aterros sanitários. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 5, n. 1, p. 108-116, 2020.

RAHIM, N. N. R. N. A. A Non-Market Valuation Approach to Environmental Cost-Benefit Analysis for Sanitary Landfill Project Appraisal. **Sustainability**, v. 13, n. 14, p. 7718, 2021.

RECESA - Rede de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental. **Esgotamento sanitário: operação e manutenção de sistemas simplificados de tratamento de esgotos**. Guia do profissional em treinamento: nível 2 / Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). Belo Horizonte: ReCESA, 2008.

RIBEIRO, E. D. *et al.* Determinação da vazão ideal de captação (m³/h) de gás metano em drenos horizontais de um aterro sanitário da Região Metropolitana de Fortaleza - CE. In: **Fórum Internacional de Resíduos Sólidos – FIRS**, n° 10, 12 a 14 jun. 2019, João Pessoa. Anais do Fórum Internacional de Resíduos Sólidos, João Pessoa: [s.n.], 2019, p. 1-10.

RUFO, R. C., PIKANÇO, A. P. Avaliação de impactos ambientais e proposta de remediação do lixão do município de Porto Nacional -TO. Anais. In: Saneamento ambiental Brasileiro: Utopia ou realidade?. ABES, 2005. p. 1-5.

SALES, A. Com 11 dos 184 municípios servidos por aterros sanitários, CE ainda tem muito a avançar. **Agência Eco Nordeste**. 26 ago. 2020. Disponível em: <https://agenciaeconordeste.com.br/com-11-dos-184-municipios-servidos-por-aterros-sanitarios-ce-ainda-tem-muito-a-avancar/#:~:text=Nela%2C%20o%20enfoco%20C3%A9%20o,de%20CTR%20s%20C3%A3o%20conquistas%20recentes>. Acesso em: 07 mar 2023.

SANTOS, G. O.; MOTA, F. S. B. **Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Domiciliares de Fortaleza/CE Dispostos no Aterro Sanitário de Caucaia/CE**. 2009. Disponível em: <<https://ojs.unifor.br/tec/article/view/5334/4507>>. Acesso em: 23 maio 2023.

SANTOS, L. M. **Erosão em taludes de corte: métodos de proteção e estabilização**. Guaratinguetá, São paulo: [s.n.], 2014. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/124253/000819172.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: jul de 2023.

APÊNDICE A – MARCOS REGULATÓRIOS

MARCOS REGULATÓRIOS		
LEI	TÍTULO	DESCRIÇÃO
LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010	Política Nacional de Resíduos Sólidos	Dispõe sobre a gestão integrada e o gerenciamento dos resíduos sólidos, tratando sobre as responsabilidades dos geradores, incentivando novas tecnologias que reduzam os impactos ambientais e padrões sustentáveis de consumo. Além disso, determina que os resíduos devem passar por diferentes destinações antes de serem dispostos, como o reuso, a não geração e/ou a redução, a reciclagem, além de outros tratamentos cabíveis, com o objetivo de reduzir a quantidade de resíduos que serão enviados à disposição final. E, com isso, estabelece a destinação final ambientalmente adequada para os resíduos sólidos são os aterros sanitários, uma vez que estes causam os mínimos impactos ambientais, desde que estejam de acordo com todos os critérios e normas estabelecidos. Determina também a extinção e recuperação de lixões.
LEI Nº 11.445, DE 5 DE JANEIRO DE 2007	Política Nacional de Saneamento Básico	Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico, determina os serviços públicos de saneamento básico e, entre eles, a limpeza urbana e o manejo dos resíduos sólidos, incluindo atividade, infraestrutura e instalação operacional de destinação final do lixo urbano.
RESOLUÇÕES		DESCRIÇÃO

Resolução
CONAMA n°
404, de 11 de
novembro de
2008

Estabelece critérios e diretrizes para o licenciamento ambiental de aterro sanitário de pequeno porte de resíduos sólidos urbanos; estabelece que o procedimento de licenciamento ambiental para aterros de pequeno porte sejam simplificados, assim como dispensada a necessidade de EIA/RIMA. Determina que esses aterros são aqueles que recebem até 20 toneladas de resíduos, que podem ser domiciliares, de limpeza urbana, resíduos hospitalares e de pequenos comércios e indústrias.

<i>NORMAS TÉCNICAS</i>	<i>TÍTULO</i>	<i>DESCRIÇÃO</i>
NBR 8419, de abril de 1992	Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos	Esta Norma fixa as condições mínimas exigíveis para a apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.
NBR 13896, de junho de 1997	Aterros de resíduos não perigosos – critérios de projeto, implantação e operação	Esta norma estabelece todos os critérios de projeto, implantação e operação para aterros não perigosos. Fixa os critérios mínimos para a localização, como a topografia, geologia, proximidade dos corpos hídricos, fauna, flora, distância de núcleos populacionais, sinalizações, acessos, entre outros. São determinadas as condições mínimas para monitoramento (poços de inspeção, padrões de proteção), dispõe sobre as camadas de impermeabilização, cobertura, drenagem e tratamento do percolado, trata da análise dos resíduos, além de planos de segurança, critérios de inspeção e manutenção e planos de encerramento.
NBR 15879, de julho de 2010	Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento	Determina as diretrizes para localização da área, projeto, implantação, operação e encerramento de um aterro sanitário de pequeno porte, ideal para cidades pouco populosas e

que permitem um sistema de disposição final simplificado. Define ainda condicionantes físicos locais que permitem a adoção deste tipo de aterro.

NBR 10007, de 2004a	Amostragem de resíduos sólidos	Esta norma fixa os requisitos exigíveis para amostragem dos resíduos sólidos, como o número e o tamanho das amostras, e todos os tipos de procedimentos de amostragem que devem ser utilizados em aterros sanitários.
NBR 10004, de 2004	Resíduos sólidos – Classificação	Classifica os resíduos sólidos de acordo com o processo ou atividade de origem, constituintes e características; quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde pública. Define o que é resíduos sólidos.
NBR 13895, de junho de 1997	Construção de poços de monitoramento e amostragem	Fixa as condições exigíveis para construção de poços de monitoramento de aquífero freático e dados mínimos para apresentação de projetos de redes de monitoramento.