



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**MATEUS ARRUDA ALBANO**

**DIMENSIONAMENTO DE UM ATERRO SANITÁRIO DE PEQUENO PORTE PARA  
A CIDADE DE MARTINÓPOLE - CEARÁ**

**FORTALEZA**

**2022**

MATEUS ARRUDA ALBANO

DIMENSIONAMENTO DE UM ATERRO SANITÁRIO DE PEQUENO PORTE PARA  
A CIDADE DE MARTINÓPOLE - CEARÁ

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado ao Curso de Graduação  
em Engenharia Ambiental da  
Universidade Federal do Ceará,  
como requisito parcial à obtenção do  
grau de Bacharel em Engenharia  
Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Anderson  
Borghetti Soares.

**FORTALEZA**

**2022**

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)

---

- A286d Albano, Mateus Arruda.  
Dimensionamento de um aterro sanitário de pequeno porte para a cidade de Martinópolis - Ceará /  
Mateus Arruda Albano. – 2022.  
61 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,  
Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2022.  
Orientação: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.
1. Aterro sanitário. 2. Dimensionamento. 3. Escoamento superficial. I. Título.

CDD 628

---

MATEUS ARRUDA ALBANO

DIMENSIONAMENTO DE UM ATERRO SANITÁRIO DE PEQUENO PORTE PARA  
A CIDADE DE MARTINÓPOLE - CEARÁ

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Aprovado em 19/07/2022

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Ronaldo Steffanuti  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Mariana Vella Silveira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

## RESUMO

Nos últimos anos vem crescendo o apelo da sociedade para com a sustentabilidade e para a preservação do meio ambiente. O aterro sanitário tem se mostrado uma excelente maneira para a disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU). Dentro desta técnica, existe uma vasta variedade de mecanismos que podem ser aplicados com o objetivo de isolar o resíduo e seus decompostos do meio ambiente, a fim de preservá-lo e evitar uma série de impactos ambientais. O presente trabalho teve como objetivo propor o dimensionamento de alguns sistemas de proteção ambiental para aterros sanitários de pequeno porte. Como metodologia foram selecionados dados referentes a uma pequena cidade do estado do Ceará, para se dimensionar os componentes mais importantes de um aterro de RSU. Com os dados populacionais e de geração de resíduos foi possível obter o peso total de resíduo a serem destinados ao aterro sanitário de pequeno porte ao longo da sua vida útil, o que junto com dados climatológicos, dados geotécnicos, entre outros, permitiram a elaboração do dimensionamento de componentes do aterro, tais como: da trincheira, do sistema de impermeabilização, do sistema de drenagem de lixiviado, do sistema de drenagem de escoamento superficial, do sistema de drenagem de gases e das camadas de proteção superficial. Os resultados apresentados aqui servirão de base para futuros trabalhos e auxiliarão no dimensionamento de práticas de engenharia de aterros de resíduos sólidos urbanos.

**Palavras-chave:** aterro sanitário, lixiviado, escoamento superficial, proteção ambiental.

## **ABSTRACT**

In recent years, the appeal of society towards sustainability and the preservation of the environment has been growing. The sanitary landfill has proved to be an excellent way for the final disposal of urban solid waste (USW). Within this technique, there is a wide variety of mechanisms that can be applied in order to isolate the waste and its decomposed from the environment, in order to preserve it and avoid a series of environmental impacts. The present work had as objective to exhibit some techniques of dimensioning of sanitary landfills. As a methodology, data referring to a small city in the state of Ceará were selected, to dimension the most important components of a USW landfill. With population and waste generation data, it was possible to obtain the total weight of waste to be sent to the small sanitary landfill throughout its useful life, which together with climatological data, geotechnical data, among others, allowed the elaboration of the dimensioning of landfill components, such as: the trench, the waterproofing system, the leachate drainage system, the surface runoff drainage system, the gas drainage system and the surface protection layers. The results presented here will serve as a basis for future works and will help in the design of engineering practices for urban solid waste landfills.

**Keywords:** landfill, leachate, surface runoff, environmental protection.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>9</b>
<b>2 OBJETIVO</b>	<b>10</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>11</b>
3.1 Introdução	11
3.2 Resíduos sólidos	11
3.2.1 <i>Resíduos sólidos urbanos</i>	11
3.3 Classificação dos RSU	12
3.4 Composição Gravimétrica dos RSU	12
3.5 Peso específico dos RSU	14
3.6 Propriedades geotécnicas dos RSU	14
3.6.1 <i>Permeabilidade</i>	15
3.6.2 <i>Resistência ao cisalhamento</i>	17
3.6.3 <i>Compressibilidade (recalques)</i>	18
3.7 Aterro sanitário de resíduos sólidos	20
3.7.1 <i>Aterro sanitário de pequeno porte</i>	20
3.8 Etapas de projeto de um aterro sanitário	21
3.8.1 <i>Escolha de área para aterro sanitário</i>	21
3.8.2 <i>Análise topográfica</i>	22
3.8.3 <i>Investigações geotécnicas do solo de fundação</i>	22
3.8.4 <i>Dados climatológicos da região</i>	23
3.9 Etapas de dimensionamento de aterros de resíduos sólidos urbanos	23
3.9.1 <i>Quantificação de resíduos sólidos gerados</i>	23
3.9.1.1 <i>População</i>	23
3.9.1.1.1 <i>Método aritmético</i>	24
3.9.1.1.2 <i>Método Geométrico</i>	24
3.9.2 <i>Sistemas de impermeabilização</i>	26
3.9.2.1 <i>Condições para a dispensa do sistema de proteção de fundo</i>	27
3.9.3 <i>Sistema de drenagem do percolado</i>	28
3.9.4 <i>Drenagem de biogases</i>	31
3.9.5 <i>Camadas de cobertura</i>	33
<b>4 METODOLOGIA: DIMENSIONAMENTOS E RESULTADOS</b>	<b>35</b>
4.1 Determinação da geometria do aterro	35
4.2 Sistema de drenagem	40
4.2.1 <i>Estimativa da quantidade de percolado gerado</i>	40
4.2.2 <i>Projetando o sistema de drenagem de percolado</i>	42
4.3 Dimensionamento do sistema de impermeabilização	43
4.3.2 <i>Esforços devido ao peso próprio</i>	44
4.3.3 <i>Esforços devido a recalques diferenciais</i>	46
4.3.4 <i>Esforço devido ao puncionamento estático</i>	49
4.3.5 <i>Esforço devido ao puncionamento dinâmico</i>	51

<b>4.3.6 Comprimento de ancoragem</b>	<b>53</b>
<b>4.4 Sistema de drenagem de gases</b>	<b>55</b>
<b>4.5 Calhas de escoamento superficial</b>	<b>56</b>
<b>5 CONCLUSÃO</b>	<b>60</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>61</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Enquanto o hábito de consumo das pessoas vem aumentando ao longo do tempo, está havendo uma mudança de mentalidade e conseqüentemente o desenvolvimento de ações que consideram os impactos relacionados ao meio ambiente e ao social. O aumento dos hábitos de consumo acarreta em um aumento na geração de resíduos sólidos urbanos (RSU). Para exemplificar, a geração per capita de resíduos sólidos urbanos passou de 348,3 kg/hab.ano em 2010 para 379,2 kg/hab.ano em 2019 no Brasil, segundo dados de geração de resíduo per capita do PANORAMA ABRELPE (2020).

Esses resíduos, quando destinados de forma incorreta e por possuírem um alto poder contaminante, podem desencadear em uma série de impactos ambientais nos solos, no ar e em corpos hídricos como: rios, mananciais, mares e lençóis freáticos. Entende-se por destinação incorreta como encaminhamento de resíduos sólidos urbanos para "lixões", que são locais selecionados para dispor resíduos sem quaisquer critérios de engenharia. Nos lixões, não é feito nenhum tipo de encapsulamento, que resulta na contaminação de corpos hídricos, solos e ar.

O cenário do ano de 2020 mostra que 59,5% dos resíduos no Brasil são destinados adequadamente, em aterros sanitários, contra 56,8% de 2010, que indica um pequeno aumento em uma década (de apenas 2,7%), segundo os dados da ABRELPE, demonstrando o cenário desafiador. Nas últimas décadas o mundo está adquirindo um apelo maior pelas práticas ASGs (Ambiental, Social e Governança) dentro deste contexto é essencial que o aumento da disposição final seja em aterros sanitários.

No Brasil, em 2 de agosto de 2010, foi aprovada a lei 12.305/2010 que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). É através dela que estados e municípios regem suas diretrizes e estabelecem os seus planos estaduais e municipais de resíduos sólidos com o objetivo de melhor destinar os resíduos gerados por seus habitantes e melhor preservar o meio ambiente.

A correta disposição dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários utilizando critérios de engenharia é fundamental para mitigar os impactos causados por esses resíduos que futuramente podem afetar o solo, os corpos hídricos, o ar e os seres vivos.

## 2 OBJETIVO

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo propor uma solução para etapas de dimensionamento de um aterro sanitário de pequeno porte, considerando os dados populacionais da cidade de Martinópolis, localizada no interior do Ceará.

As metodologias utilizadas para o dimensionamento, visam projetar diferentes elementos de um aterro sanitário de modo a manter a segurança estrutural e a segurança ambiental. As etapas de dimensionamento do aterro sanitário propostas englobam os seguintes elementos: geometria do aterro (trincheira e/ou taludes), sistema de impermeabilização (geomembrana e argila compactada), sistema de drenagem (camadas drenantes e/ou geossintéticos), camadas de coberturas, sistema de tratamento e armazenamento de lixiviado, sistema de drenagem de gases (drenos verticais).

## **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 Introdução**

Neste capítulo serão apresentados conceitos básicos necessários para o entendimento do tema a ser abordado nesse trabalho. São conceitos e definições que abordam desde o planejamento do projeto e as técnicas de engenharia envolvidas a partir de informações como as propriedades mecânicas e químicas dos resíduos obtidas a partir de normas técnicas e referências renomadas da área.

### **3.2 Resíduos sólidos**

A Política Nacional de Resíduos Sólidos define resíduos sólidos como:

“material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.” (PNRS, 2010)

#### **3.2.1 Resíduos sólidos urbanos**

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), possuem a seguinte definição segundo a ABNT NBR 15849:2010:

“resíduos que, em conformidade com o estabelecido na resolução CONAMA no 404/2008, sejam provenientes de domicílios, serviços de limpeza urbana, pequenos estabelecimentos comerciais, industriais e de prestação de serviços, que estejam incluídos no serviço de coleta regular de resíduos e, que tenham características similares aos resíduos sólidos domiciliares.” (ABNT, 2010)

### *3.2.1.1 Características*

É fundamental o conhecimento das principais características e propriedades dos RSU para se projetar um aterro sanitário. No entanto, a determinação de certas propriedades se torna um pouco limitada. Isso ocorre devido à alta heterogeneidade dos RSU, que varia de região para região, de acordo com as condições socioeconômicas, à falta de procedimentos de amostragem, de ensaios padronizados e à alteração das propriedades dos RSU com o tempo. (SANTOS, 2012)

O conhecimento da composição dos resíduos sólidos permite o adequado planejamento do setor por meio de estratégias, políticas públicas e processos específicos que assegurem a destinação ambientalmente adequada preconizada pela PNRS, levando-se em consideração as melhores alternativas disponíveis e aplicáveis, de acordo com os tipos e quantidades de resíduos existentes. (ABRELPE, 2020)

## **3.3 Classificação dos RSU**

Os RSU são classificados como resíduos classe II B, pela norma ABNT NBR 10004:2004. A classificação é obtida através de ensaios de lixiviação e solubilização a partir da obtenção de amostras segundo as normas ABNT NBR 10005:2004, ABNT NBR 10006:2004 e ABNT NBR 10007:2004. Através de ensaios propostos por essas normas, são coletadas as características dos materiais baseados nas seguintes propriedades: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. E a partir delas é possível definir se os resíduos se caracterizam como perigoso ou inerte.

## **3.4 Composição Gravimétrica dos RSU**

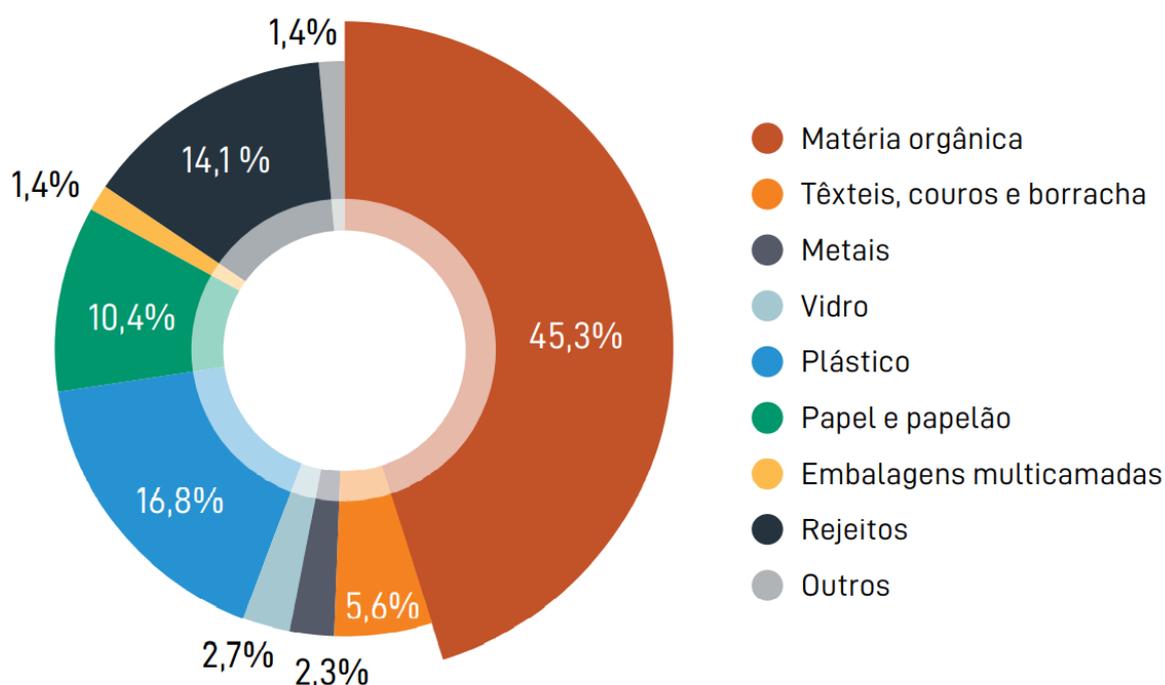
A gravimetria no contexto de resíduos nada mais é do que o processo que busca conhecer a quantidade e participação de cada componente do RSU como um todo. Segundo CEMPRE (2010), a composição pode ser obtida a partir do peso total de um determinado componente (plástico, papel, etc) em relação ao peso total de

uma amostra de RSU. A porcentagem de cada material encontrado na amostra pode ser obtida pela Equação 1:

$$\text{Material "A" (\%)} = \frac{\text{peso da fração do material "A" (kg)}}{\text{peso total da amostra (kg)}} \times 100 \quad (1)$$

A composição gravimétrica dos RSU podem variar de região para região, sofrendo influência do poder econômico das pessoas e seus hábitos culturais. A imagem abaixo apresenta a composição média do RSU no Brasil (ABRELPE, 2020), onde o que mais se destaca é a presença de 45,3% de matéria orgânica, um dos parâmetros mais importantes para o dimensionamento do aterro:

Figura 1 - Composição Gravimétrica dos RSU no Brasil



Fonte: ABRELPE, 2020

É através da composição do RSU obtida pelo processo de gravimetria que é possível obter o percentual de material orgânico presente no resíduo, que influencia diretamente na quantidade de biogás a ser produzido pelo aterro sanitário, na compressibilidade do aterro e na geração de chorume (BOSCOV, 2008).

### 3.5 Peso específico dos RSU

O peso específico é um dos dados necessários para estimar o volume de um aterro sanitário, considerando uma determinada vida útil do aterro. Os dados apresentados nas literaturas variam bastante acerca do valor a ser adotado conforme as diversas condições e locais (Tabela 1). É interessante visualizar que para condições iniciais do aterro, os resíduos possuem um peso específico ( $\gamma$ ) menor do que em condições finais.

Tabela 1 - Peso específico de RSU em diferentes condições

Autor	Peso Específico $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Local/Condições
Kaimoto&Cepolina, 1997	5,0 a 7,0	Resíduos novos, não decompostos e pouco compactados
	9,0 a 13,0	Resíduos após compactação com tratores de esteira ou rolo compactador e após a ocorrência de recalques
Santos & Presa, 1995	7,0	Resíduos recém lançados
	10,0	Resíduos após a ocorrência de recalques
Mahler &Iturri, 1998	10,5	Seção do aterro sanitário do Sítio São João com 84m de desnível e 10 meses de alteamento
Benvenuto& Cunha, 1991	10,0	Condição drenada
	13,0	Condição saturada

Fonte: LAMARE NETO (2004)

### 3.6 Propriedades geotécnicas dos RSU

Ao se projetar um aterro sobre resíduos sólidos urbanos deve-se estimar as propriedades hidromecânicas do RSU. Dentre as propriedades mais importantes destacam-se a permeabilidade, a resistência ao cisalhamento, a compressibilidade (previsão dos recalques) e as características de compactação do RSU.

### **3.6.1 Permeabilidade**

Essa característica dos RSU dita a velocidade que o chorume passa pelo resíduo até chegar no sistema de drenagem, o que determina a eficiência desse sistema. Um RSU com uma permeabilidade baixa significa que o composto apresentará bolsões de gases e chorume enclausurados, o que poderá acarretar em instabilidade no maciço (BOSCOV, 2008).

Na Tabela 2 mostram-se os valores de permeabilidade, obtidos através de vários tipos de ensaios. Valores observados em literatura internacional indicam que a permeabilidade dos RSU variam entre  $10^{-4}$  a  $10^{-6}$  m/s. No entanto, dados de permeabilidade de RSU depositados em aterros sanitários brasileiros indicaram coeficientes de entre  $10^{-8}$  a  $10^{-6}$  m/s, e esta diferença pode ser devido ao elevado teor de matéria orgânica, presente na composição dos RSU brasileiros (50-70%). (BOSCOV, 2008)

Tabela 2 – Coeficientes de permeabilidade dos RSU

Referência	Peso Específico $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Coefficiente de Permeabilidade k (m/s)	Método de Ensaio
Fungaroli& Steiner (1979)	1,1 - 4,0	$1 \times 10^{-5}$ - $2,0 \times 10^{-4}$	Determinação em lisímetros
Koriatset <i>al.</i> (1983)	8,6	$3,15 \times 10^{-5}$ - $5,1 \times 10^{-5}$	Ensaio de laboratório
Oweis&Khera (1986)	6,45	$1 \times 10^{-5}$	Estimativa de dados de campo
Oweiset <i>al.</i> (1990)	6,45	$1 \times 10^{-5}$	Ensaio de bombeamento
	9,4 - 14,0	$1,5 \times 10^{-6}$	Ensaio de campo com carga variável
	6,3 - 9,4	$1,1 \times 10^{-5}$	Ensaio em poço
Ladva& Clark (1990)	10,1 - 14,4	$1 \times 10^{-5}$ - $4,0 \times 10^{-4}$	Ensaio em poço
Gabr&Valero (1995)	-	$1 \times 10^{-7}$ - $1 \times 10^{-5}$	Ensaio de laboratório
Blenginoet <i>al.</i> (1996)	9,0 - 11,0	$3 \times 10^{-7}$ - $3 \times 10^{-6}$	Ensaio de campo em furos profundos (30 - 40m) e com carga variável
Manassero (1990)	8,0 - 10,0	$1,5 \times 10^{-5}$ - $2,6 \times 10^{-4}$	Ensaio de bombeamento (15 - 20m em profundidade)
Beaven&Powrie (1995)	5,0 - 13,0	$1 \times 10^{-7}$ - $1 \times 10^{-4}$	Ensaio de laboratório com pressão confinada de 0 - 600 kPa
Brandt (1990)	11,0 - 14,0	$7 \times 10^{-6}$ - $2 \times 10^{-4}$ (compactação com rolo)	Ensaio de campo com carga variável
	13,0 - 16,0	$5 \times 10^{-6}$ - $3 \times 10^{-7}$ (compactação dinâmica)	Ensaio em poço
Brandt (1994)	9,0 - 12,0	$2 \times 10^{-5}$ - $1 \times 10^{-6}$	Ensaio de laboratório
	9,0 - 12,0	$5 \times 10^{-4}$ - $3 \times 10^{-5}$ (pré-tratado)	
	13,0 - 17,0	$2 \times 10^{-6}$ - $3 \times 10^{-5}$ (muito compactado)	
Jessberger (1984)	RSU misturado com entulho	$1 \times 10^{-8}$ - $10^{-3}$	Antes da compactação dinâmica
		$3 \times 10^{-8}$ - $1 \times 10^{-5}$	Após a compactação dinâmica
Jessberger (1984)	RSU misturado com entulho	$4 \times 10^{-6}$ - $4 \times 10^{-3}$	Antes da compactação dinâmica
		$1 \times 10^{-7}$ - $1 \times 10^{-4}$	Após a compactação dinâmica
Santos <i>et al.</i> (1998)	14,0 - 19,0	$1 \times 10^{-7}$	Ensaio <i>in situ</i> em furo de sondagem

Fonte: KONIG & JESSBERGER, 1997 apud CARVALHO, 1999, adaptado pelo autor.

O mais adequado para determinar o coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) dos RSU são os ensaios triaxiais, permeâmetros (ensaio de laboratório) e furo de sondagem (campo).

Figura 2 – Obtenção do coeficiente de permeabilidade em resíduos: laboratório



Fonte: Apostila de Geotecnia Ambiental (2019)

Na Tabela 3 mostra que os RSU apresentam um comportamento de permeabilidade parecido com o de um silte, caracterizando os RSU como materiais drenantes.

Tabela 3 – Coeficientes de permeabilidade dos solos

<b>Tipos de Solo</b>	<b>Coeficiente de Permeabilidade <math>k</math> (m/s)</b>
Areias grossas	$10^{-3}$
Areias médias	$10^{-4}$
Areias finas	$10^{-5}$
Areias argilosas	$10^{-7}$
Siltes	$10^{-6}$ a $10^{-9}$
Argilas	$< 10^{-9}$

Fonte: SOUZA PINTO, 2006.

### **3.6.2 Resistência ao cisalhamento**

Quando se pensa em um projeto para um aterro sanitário, um dos grandes anseios é que o resíduo ocupe o menor espaço possível, afinal, não é desejável perder espaço que poderia ser utilizado para outras atividades apenas para o

armazenamento de resíduos. Logo, para garantir a segurança do conjunto e permitir que esse armazenamento ocorra de forma confiável, é importante ter definido os parâmetros de resistência do RSU.

No cálculo de estabilidade de um talude, é necessário conhecer a resistência ao cisalhamento do material. Assim como no caso dos solos, para análise da resistência ao cisalhamento dos RSU é utilizada a envoltória de resistência de Mohr Coulomb. É associado aos resíduos um valor de coesão ( $c$ ) e um valor de ângulo de atrito ( $\phi$ ). A determinação desses parâmetros pode ser feita através de análises bibliográficas, ensaios de campo, ensaios de laboratório e por retro análises de aterros rompidos (BOSCOV, 2008). Através da figura 3 é possível visualizar uma faixa de valores de  $c$  e  $\phi$  que podem ser adotados em projeto.

Figura 3 – Faixa de parâmetros de resistência do RSU recomendados para projeto



Fonte: LAMARE NETO (2004)

### 3.6.3 Compressibilidade (recalques)

Os recalques nos RSU são muito elevados quando comparados a maciços de solos. A estimativa de velocidades dos recalques é particularmente importante para estimar a vida útil do aterro sanitário. A Tabela 4 mostra os recalques observados em aterros sanitários.

Tabela 4 - Recalques em maciços sanitário

Autor	Recalque relativo à espessura inicial
Sowers (1973)	Da ordem de 30%
Wall e Zeiss (1995)	Entre 25% e 50%
Van Meerten et al. (1995)	Entre 10% e 25%
Coumoulos e Koryalos (1997)	Entre 20% e 25%
Abreu (2000)	Entre 10% e 30%

Fonte: (BOSCOV, 2008)

Dentre os mecanismos associados à compressão dos RSU pode-se citar:

- a) Solicitação mecânica → distorção, dobra, esmagamento, quebra e rearranjo;
  - b) Ravinamento interno → erosão e migração de materiais finos para vazios maiores
  - c) Alterações físico-químicas → corrosão, oxidação, combustão, etc
  - d) Biodegradação → transformação da massa sólida em líquido e gases
  - e) Dissipação das pressões neutras de líquidos e gases → expulsão de líquidos e gases do interior do maciço com o tempo (semelhante ao adensamento)
  - f) Creep → Deformação lenta sob carga constante (fenômenos viscosos)
- Interação dos mecanismos.

Os aterros sanitários apresentam uma deformabilidade bem elevada, isso se deve aos mecanismos variáveis como a degradação da matéria orgânica, a grande quantidade de vazios e a heterogeneidade dos RSU (BOWDERS et al, 2000).

A quantidade de recalques que afetam os maciços de RSU tem elevada importância, uma vez que com o aumento desses recalques, aumenta-se também o volume para disposição de mais resíduos. Como sempre há uma crescente geração de resíduos e uma diminuição dos espaços disponíveis, esse aspecto torna-se mais importante na atualidade. (SOUZA PINTO, 2006)

Segundo Ling et al. (1998), os recalques finais de um aterro sanitário podem chegar até 40% da altura inicial. Apesar dos pontos positivos dos recalques,

liberando mais espaço para dispor mais resíduos, a ocorrência de recalques após o fechamento do aterro, pode ocasionar trincas na cobertura final de terra.

### **3.7 Aterro sanitário de resíduos sólidos**

É uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais. Um aterro sanitário utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível. Os resíduos são isolados do meio ambiente por meio de sistemas de impermeabilização de base e de coberturas (diária, intermediária e final). Abaixo temos como exemplo o aterro sanitário municipal de São José dos Campos com inúmeras camadas de resíduo e cobertura.

Figura 4 - Aterro Sanitário Municipal Joseense - São José dos Campos



Fonte: Site da Prefeitura de São José dos Campos (2021)

#### **3.7.1 Aterro sanitário de pequeno porte**

Os aterros sanitários de pequeno porte, segundo a ABNT NBR 15849:2010, são aqueles concebidos para recebimento de até 20 toneladas diárias de resíduos sólidos urbanos (em final de plano). Por se tratar de uma estrutura de pequeno porte, a concepção do sistema pode ser simplificada, reduzindo os elementos de proteção ambiental sem prejuízo da minimização dos impactos ao meio ambiente e

à saúde pública. Abaixo temos o exemplo de um aterro de pequeno porte em início de operação. (SILVA, 2009)

Figura 5 - Imagem de um aterro sanitário de pequeno porte em início de operação



Fonte: SILVA (2009)

### **3.8 Etapas de projeto de um aterro sanitário**

Para que o aterro cumpra com o seu objetivo de isolar os resíduos sólidos urbanos do meio ambiente, é necessário que as etapas do projeto do aterro sanitário sejam todas bem executadas. Abaixo estão elas:

#### **3.8.1 Escolha de área para aterro sanitário**

A primeira etapa na construção de um aterro é a definição da sua localização. Essa escolha envolve fatores como zoneamento da região, plano diretor do município, grau de urbanização da cidade, aceitação da população, parâmetros técnicos das normas e diretrizes federais, estaduais e municipais, distância de vias de transporte e da fonte de abastecimento de água.

De forma geral, se opta por regiões das quais a prefeitura já possui a posse e adicionalmente, que já foram degradadas anteriormente. O objetivo é reaproveitar a

região e até mesmo revitalizar regiões, como por exemplo, cortes de rodovias abandonadas, pedreiras ou cavas de mineração desativadas.

Vale salientar que é interessante ter várias opções de localização em que possivelmente será instalado um aterro sanitário, pois deverá ser realizado um estudo de viabilidade com o objetivo de levantar informações acerca dos possíveis impactos desse empreendimento. A região a ser escolhida deve gerar um menor impacto social e ambiental.

Segundo Curty (2005), para se estimar a área total de um aterro sanitário, além da área necessária para o depósito dos RSU deve-se acrescentar uma área correspondente a 20% da área calculada, pois um aterro sanitário necessita de edificações auxiliares e de apoio, como, guarita, uma balança rodoviária, prédio de administração e um galpão de manutenção e oficina coberta.

### **3.8.2 Análise topográfica**

Como todo bom projeto de Engenharia, a análise topográfica se faz necessária. No caso dos aterros sanitários, isso é importante já que impacta diretamente na conformação dos resíduos e no formato do aterro. A ABNT NBR 15849:2010 estipula que uma área de aterro deve ter entre 1% e 30% de declividade.

### **3.8.3 Investigações geotécnicas do solo de fundação**

É de suma importância o conhecimento das configurações e características das camadas de solos subjacentes ao aterro sanitário, bem como a profundidade do lençol freático. A ABNT (NBR 15849:2010) recomenda que sejam realizadas sondagens de simples reconhecimento com ensaio SPT (Standard Penetration Test). O número de pontos de sondagem deve ser suficiente para permitir uma adequada caracterização das camadas do subsolo.

A norma ainda estabelece que em paralelo aos ensaios de reconhecimento, hajam ainda os ensaios para determinar a permeabilidade do solo. A região deve corresponder a uma área que abranja toda a base do aterro, bem como os ensaios in situ sejam realizados através de ensaio de carga como o de rebaixamento ou de infiltração.

### **3.8.4 Dados climatológicos da região**

É extremamente importante conhecer os possíveis impactos sobre o aterro e a caracterização climatológica do local de instalação do aterro sanitário. Para isso, devem ser coletados dados sobre os valores médios de temperatura, precipitação pluviométrica histórica, evapotranspiração, direção e intensidade dos ventos preponderantes na região, dentre outras. É recomendável que esses dados sejam provenientes da estação meteorológica mais próxima possível do local do aterro.

Os dados referentes à incidência de chuvas na região são importantes, uma vez que esse fator interfere na quantidade de percolado gerado, e no dimensionamento dos sistemas de drenagem e de tratamento de chorume, além do sistema de drenagem de águas pluviais.

Conforme a ABNT NBR 15849:2010, em caso de existência de núcleos populacionais próximos da região levantada à priori para o aterro, devem ser obtidas informações sobre a direção predominante e intensidade média dos ventos incidentes no local. Essa investigação sobre ventos permitirá a análise do efeito do carreamento de particulado e de odores gerados pelo aterro para as habitações vizinhas.

## **3.9 Etapas de dimensionamento de aterros de resíduos sólidos urbanos**

### **3.9.1 Quantificação de resíduos sólidos gerados**

Para estimar a quantidade de resíduos a serem gerados em um ou determinado número de municípios, é necessário possuir dados acerca da população ( $P$ ) que enviará os seus RSU para o aterro, a taxa de crescimento populacional ( $K$ ), a geração per capita de resíduos sólidos urbanos (GPCR), e a vida útil do aterro sanitário ( $V_u$ ).

#### **3.9.1.1 População**

Para saber a população que se beneficiará do aterro durante toda a sua vida útil, é necessário estimar a taxa de crescimento da população. Existem diversas

maneiras de se estimar a taxa de crescimento de uma determinada população. A seguir são apresentados dois exemplos de modelos que cumprem com essa finalidade: o método aritmético e o método geométrico.

#### 3.9.1.1.1 Método aritmético

A seguir apresentado está o método aritmético. O método aritmético possui as seguintes expressões:

$$P_t = P_0 + K_a(t - t_0) \quad (2)$$

$$\frac{dP}{dt} = K_a \quad \therefore \quad K_a = \frac{P_2 - P_0}{t_2 - t_0}$$

Onde,

$K_a$  = Coeficiente de crescimento populacional aritmético

$t_2$  = Segundo ano de referência para o cálculo do  $K_a$

$t_0$  = Ano inicial

$t$  = Ano final

$P_0$  = População inicial

$P_2$  = População do segundo ano de referência para o cálculo do  $K_a$

$P_t$  = População final

#### 3.9.1.1.2 Método Geométrico

A seguir apresentado está o método geométrico. O método geométrico possui as seguintes expressões:

$$K_g = \frac{(\ln P_2 - \ln P_0)}{(t_2 - t_0)} \quad (3)$$

$$P_t = P_0 \times e^{K_g(t - t_2)}$$

Onde,

$K_g$  = Coeficiente de crescimento populacional geométrico

$t_2$  = Segundo ano de referência para o cálculo do  $K_g$

$t_0$  = Ano inicial

$t$  = Ano final

$P_0$  = População inicial

$P_2$  = População do segundo ano de referência para o cálculo do  $K_g$

$P_t$  = População final

Após termos os dados populacionais de início de projeto, a taxa de crescimento da população anual durante a vida útil do aterro, basta multiplicarmos pela geração de resíduo per capita anual acrescida anualmente pela sua taxa de crescimento para obtermos o volume de resíduos a serem destinados para o aterro durante a sua vida útil.

$$Peso_{residuo\ anual} = P \times GRPC_{anox} \quad (4)$$

$$Peso_{residuo\ total} = P_{ano1} \times GRPC_{ano1} + P_{ano2} \times GRPC_{ano2} + \dots + P_{anof} \times GRPC_{anof}$$

$$Vt = Peso_{residuo\ ano1} \times \gamma + Peso_{residuo\ ano2} \times \gamma + \dots + Peso_{residuo\ anof} \times \gamma$$

Onde,

$P$  = População da qual destinará o seu resíduo ao aterro

$GRPC$  = Geração de resíduo per capita

$Peso_{residuo\ total}$  = Peso total do resíduo a ser destinado ao aterro

$\gamma$  = Densidade do RSU

$Vt$  = Volume total a ser destinado ao aterro

$Vu$  = Vida útil do aterro em anos ( *anof* )

Desta maneira é possível estimar as informações anuais de população e geração de RSU anual, permitindo uma visão inicial da capacidade do aterro a ser projetado.

### **3.9.2 Sistemas de impermeabilização**

Com o objetivo de proteger o solo natural e as águas subterrâneas, o sistema de proteção de fundo deve minimizar a infiltração de lixiviados e biogás no solo de fundação do aterro até concentrações que não prejudiquem o meio ambiente e a saúde humana. Esse sistema deve apresentar características como estanqueidade, durabilidade, resistência mecânica e às intempéries, compatibilidade física, química e biológica com os resíduos a serem depositados no aterro. (CEMPRE, 2018)

Sua execução pode ser realizada por intermédio da compactação de uma camada de baixa permeabilidade sobre o solo de fundação, pelo uso de geossintéticos com finalidades impermeabilizantes ou pela combinação de ambos, em função do porte do aterro. Os principais solos utilizados para esta finalidade são os argilosos. No caso dos geossintéticos, o polietileno de alta densidade (PEAD) tem apresentado boa experiência acumulada no Brasil, Estados Unidos e Alemanha. (CEMPRE, 2018). Seu coeficiente de permeabilidade é da ordem de  $10^{-12}$  cm/s (ALVES, 2015).

A execução do revestimento de fundo deve seguir um rigoroso controle tecnológico para a garantia de sua qualidade. A Figura 6 ilustra um esquema de configuração para a camada de revestimento de fundo. Nessa figura foi utilizada uma camada composta por geomembrana e argila impermeável.

A imagem abaixo demonstra as camadas de impermeabilização de solo, de drenagem de lixiviado e a camada de filtração, que impede o contato direto do resíduo com a camada drenante, o que aumenta a vida útil do sistema.

Figura 6 - Configuração de uma camada de proteção de fundo



Fonte: BOSCOV (2008)

O Manual Brasileiro de Geossintéticos (2004), apesar de citar a existência de um modelo de barreira com geomembrana simples para aterros (apenas a geomembrana sob o solo natural), recomenda pelo menos a aplicação de duas técnicas ou camadas em conjunto, em especial geomembrana e argila compacta, se tratando por fim, de uma barreira composta. O objetivo é se resguardar de eventuais falhas de fabricação da geomembrana ou possíveis danos causados durante a operação.

É importante salientar que nos processos de impermeabilização a garantia de qualidade não fica atestada somente pela definição de materiais empregados, mas sim, com adequado projeto de aplicação e controle tecnológico de execução.

### 3.9.2.1 Condições para a dispensa do sistema de proteção de fundo

De acordo com a ABNT NBR 15849:2010, se atendido determinados critérios, em um aterro de pequeno porte é possível que o sistema de impermeabilização de fundo seja dispensado. Esses critérios incluem a porcentagem de matéria orgânica nos resíduos, a profundidade do lençol freático, a permeabilidade do solo local e o valor de excedente hídrico anual. O excedente hídrico (EH) em aterros sanitários,

refere-se à quantidade de água (mm/ano) que percola através da camada cobertura do aterro, atingindo a massa de resíduos e posteriormente chegando até a base do aterro. A tabela 5 dispõe os valores limites considerados em cada critério.

Tabela 5 - Critérios para dispensa do sistema de impermeabilização de fundo

Limites máximos do excedente hídrico (EH, mm/ano) para a dispensa da impermeabilização complementar.		Fração orgânica dos resíduos $\leq 30\%$				Fração Orgânica dos resíduos $> 30\%$			
		Profundidade do freático (m)				Profundidade do freático (m)			
		$1,50 < n \leq 3$	$3 < n < 6$	$6 \leq n < 9$	$n \geq 9$	$1,50 < n \leq 3$	$3 < n < 6$	$6 \leq n < 9$	$n \geq 9$
Coeficiente de permeabilidade do solo local k (cm/s)	$k \leq 1 \times 10^{-6}$	250	500	1000	1500	188	375	750	1125
	$1 \times 10^{-6} \leq k \leq 1 \times 10^{-5}$	200	400	800	1200	150	300	600	900
	$1 \times 10^{-5} \leq k \leq 1 \times 10^{-4}$	150	300	600	900	113	225	450	675

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010)

### 3.9.3 Sistema de drenagem do percolado

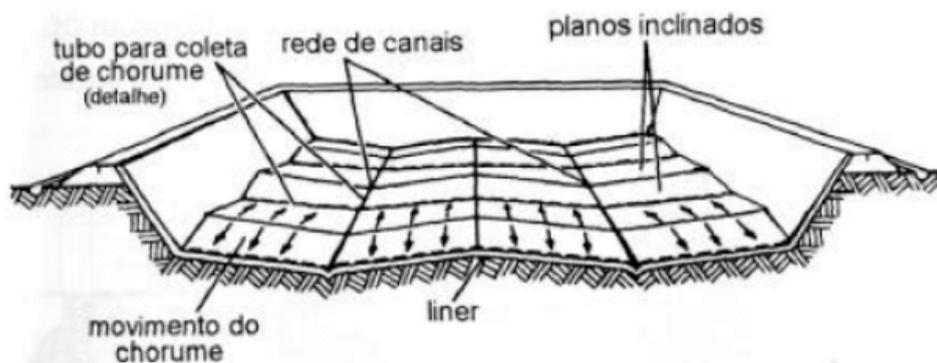
O sistema de drenagem do percolado apresenta papel fundamental na diminuição da pressão do líquido na massa de RSU, garantindo uma melhor estabilidade do maciço e também na diminuição do potencial de infiltração no subsolo (BOSCOV, 2008). Esse sistema deve coletar e conduzir o lixiviado para o local de acumulação e o seu posterior tratamento.

O sistema de drenagem pode ser composto por drenos de material filtrante e tubos perfurados. Segundo BOSCOV (2008), os tipos de solos empregados com função filtrante são as areias, britas, bica corrida (diâmetros entre 0 e 76 mm) e rachão (diâmetros entre 20 e 76 mm). Para evitar que o sistema de drenagem seja atacado pelo chorume, os seixos quartzosos de origem fluvial (homogêneos e estáveis) costumam ser mais indicados do que as britas (CEMPRE, 2018).

O dimensionamento desse sistema depende da geometria da massa de RSU e da vazão a ser drenada. Os drenos podem ser escavados diretamente no solo e preenchidos com material drenante ou podem ser dispostos sobre a camada de base impermeabilizada do aterro. Eles são comumente acoplados ao sistema de drenagem dos gases. Abaixo estão apresentados exemplos de sistema de

drenagem de fundação, a Figura 7 se refere ao sistema de drenagem em formato de espinha de peixe.

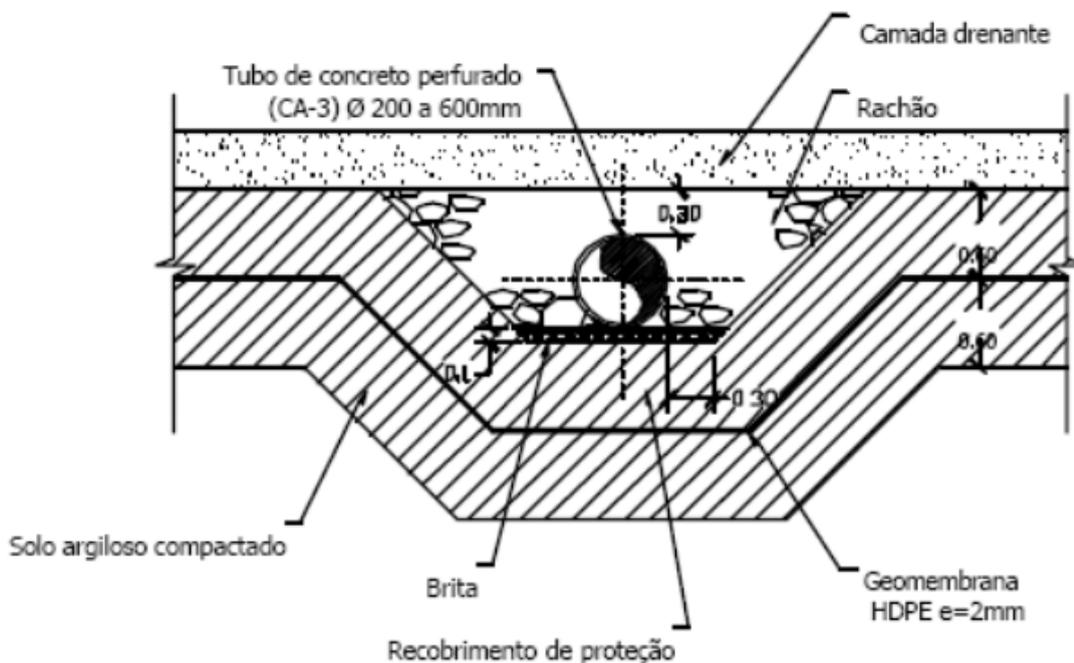
Figura 7 – Exemplo de sistema de drenagem de fundação



Fonte: OLIVEIRA (2002)

A Figura 8 trata-se da de um corte frontal ao dreno nesse tipo de sistema.

Figura 8 – Exemplo de sistema de drenagem de fundação



Fonte: OLIVEIRA (2002).

No caso de aterro de pequeno porte, a ABNT NBR 15849:2010 recomenda que a drenagem de fundo seja feita com material rochoso ou algum outro material que permita espaços livres de forma a evitar a colmatação. A carga hidráulica na base do aterro não deve ultrapassar 0,30 m e, se necessário, os drenos devem ser recobertos com material capaz de drenar os líquidos e reter as partículas finas.

Os drenos são dimensionados a partir do conhecimento da vazão do percolado. Um dos métodos utilizados e de fácil aplicação, quando não se tem muitos dados disponíveis, que é o caso de pequenos municípios, é o método Suíço. Segundo BARROS (2004), este método considera a hipótese de que todo o lixiviado gerado é função exclusivamente da água de chuva. No entanto, apenas uma porcentagem de todo volume precipitado sobre o aterro resultará na geração de lixiviado. Em resumo, o método empírico suíço é expresso por:

$$Q = \left( \frac{P \times A \times K}{t} \right) \quad (5)$$

Onde,

$Q$  = Vazão média do percolado em litros por segundo

$P$  = Precipitação média anual (mm)

$A$  = Área total do aterro m<sup>2</sup>

$t$  = Número de segundos em 1 ano que é de 31.536.000 segundos

$K$  = Coeficiente que depende do grau de compactação dos resíduos sólidos urbanos.

Tabela 6 - Relação do coeficiente K e do peso específico do RSU

<b>Tipo de Aterro</b>	<b>Peso Específico do Lixo</b>	<b>K</b>
<b>Aterros Fracamente Compactados</b>	0,4 a 0,7 ton/m <sup>3</sup>	0,25 a 0,50
<b>Aterros Fortemente Compactados</b>	Acima de 0,7 ton/m <sup>3</sup>	0,15 a 0,25

Fonte: (Orth, 1981, apud Neto et alii, 1999).

O sistema de drenagem pode ser feito de valas preenchidas com pedras, britas; com tubos perfurados, envoltos em britas para proteger da entrada de partículas no dreno e até mesmo por um sistema de tapete drenante.

### **3.9.4 Drenagem de biogases**

Os aterros sanitários podem ser entendidos como verdadeiros e heterogêneos reatores biológicos, tendo como principais componentes de entrada e alimentação, os resíduos sólidos e a água, e como principais elementos de saída, os líquidos percolados e o biogás. A decomposição dos resíduos sólidos urbanos em um aterro sanitário dá-se tanto por processos aeróbios quanto por processos anaeróbios de digestão da matéria orgânica, sendo a diferença básica entre os processos, a presença ou ausência de oxigênio (MARQUES, 2001).

Os fatores que principalmente influenciam nos processos de biodegradação são: granulometria, composição e idade do resíduo, umidade do resíduo, temperatura no aterro, aspectos quantitativos e qualitativos de nutrientes, pH dos líquidos presentes no aterro e a densidade e grau de compactação dos resíduos.

A geração de gases por parte da biodegradabilidade dos resíduos sempre chamou a atenção dos engenheiros e cientistas pela possibilidade do aproveitamento desses gases para a geração de energia. Assim, algumas formulações matemáticas para a representação da geração dos gases em aterros sanitários foram desenvolvidas.

O processo de biodegradação e geração dos gases é assumida hoje como um processo do qual possui cinco fases, como ser visto na Figura 9:

**Fase I** – Ajuste Inicial ou Fase Aeróbia: Nesta fase, ocorre a decomposição aeróbia da matéria orgânica, devido a existência do oxigênio no resíduo recém depositado. Pode-se verificar a produção de CO<sub>2</sub> e o consumo de N<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>, sem nenhuma geração de gás metano. Ocorre cerca de 5 a 10% de degradação da matéria sólida passível de transformação em gases.

**Fase II** – Fase de Transição: Com a extinção do oxigênio passa-se para a decomposição anaeróbia. O material orgânico complexo é decomposto e transformado em ácidos orgânicos, dando-se início à próxima fase. Nota-se aumento na produção de CO<sub>2</sub>. As condições anaeróbias podem ser monitoradas pelo potencial redox.

**Fase III** – Fase Ácida ou Anaeróbia Ácida: Nota-se a continuidade da formação de ácidos orgânicos iniciada na fase anterior. Verifica-se a formação de ácidos como o sulfídrico, acético, fúlvico, etc. Os microorganismos envolvidos são tipicamente não-metanogênicos e são chamados de acidogênicos. Nesta fase, cerca

de 15 a 20% da matéria sólida com potencial de conversão em gás está decomposta. Os líquidos percolados nesta fase apresentam pH não superior a 5 e são característicos elevados valores de DBO e DQO. Nota-se aumento considerável na produção de CO<sub>2</sub> e pequena quantidade de H<sub>2</sub>.

**Fase IV – Fase Metanogênica (Acelerada):** A produção de ácidos e metano ocorre simultaneamente sendo a taxa de produção de ácidos reduzida. A conversão dos ácidos e do H<sub>2</sub> em CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> irá aumentar o pH atingindo uma faixa entre 6.8 e 8, enquanto que as concentrações de DBO e DQO sofrerão reduções significativas. Nestas condições (valores neutro de pH) observar-se-á, ainda, a redução da solubilidade de compostos inorgânicos, implicando uma menor quantidade de metais pesados contidos nos líquidos percolados. Uma parcela adicional da matéria sólida é degradada e convertida nesta fase.

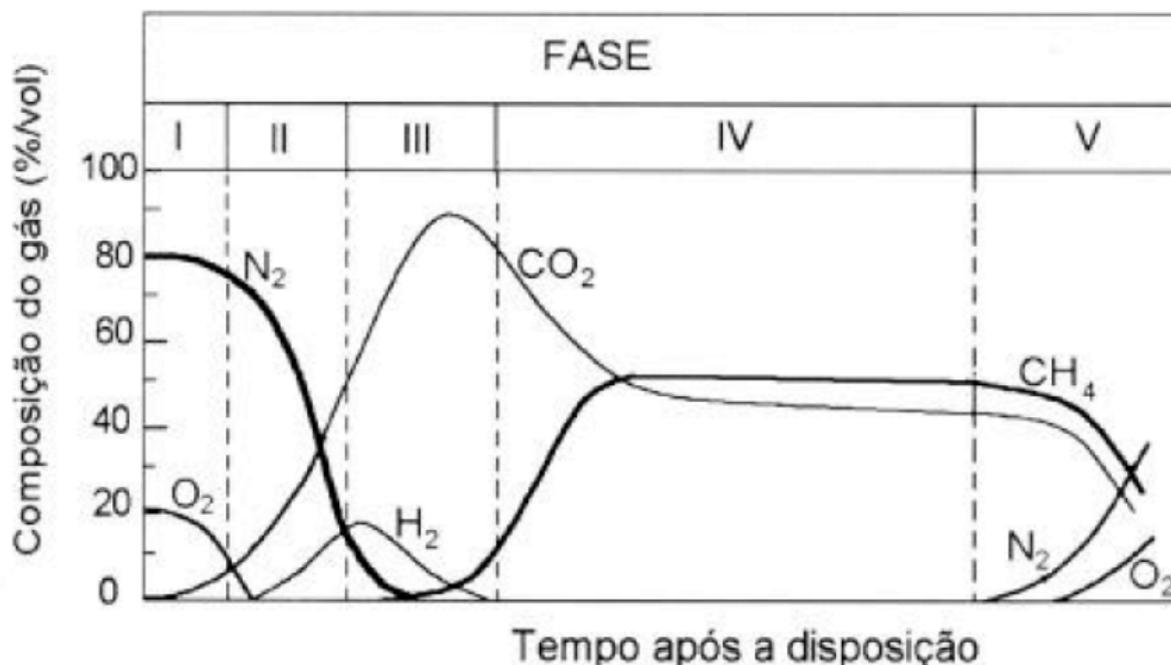
**Fase V – Fase de Maturação Final ou Metanogênica Desacelerada:** Esta fase ocorrerá depois que toda a matéria orgânica disponível for convertida em CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. A taxa de produção de gases diminui substancialmente, visto que a maioria dos nutrientes já foi removida pelos líquidos percolados nas fases anteriores e os remanescentes apresentam lento processo de biodegradação. Os principais gases formados são o CH<sub>4</sub> e o CO<sub>2</sub>, sendo que pequenas quantidades de N<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> também são formadas. A decomposição da matéria sólida atinge valores entre 50% e 70%, dependendo da produção de metano e das práticas operacionais empregadas.

Tabela 7 - Constituição típica de Biogás formado em aterros sanitários.

COMPOSIÇÃO	% (BASE SECA – VOLUME)
Metano (CH <sub>4</sub> )	45 - 60
Gás Carbônico (CO <sub>2</sub> )	40 - 60
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	2 - 5
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	0,1 - 1
Sulfatos dissulfetos, mercaptanas, etc.	0 - 1,0
Amônia (NH <sub>3</sub> )	0,1 - 1,0
Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	0 - 0,2
Monóxido de Carbono (CO)	0 - 0,2
Gases Secundários	0,01 - 0,6

Fonte: (ENGEORPS, 1996 apud OLIVEIRA, 2002).

Figura 9 - Fases de estabilização de um aterro



Fonte: (ENGEORPS, 1996 apud OLIVEIRA, 2002).

### 3.9.5 Camadas de cobertura

Após a disposição diária de resíduos, se faz necessária a adição de uma camada de solo de cobertura. O objetivo é isolar o resíduo do meio ambiente de forma a evitar a propagação de vetores e de odores. No fim da vida útil do aterro, o mesmo recebe uma camada final de cobertura que possui a função de selar o aterro.

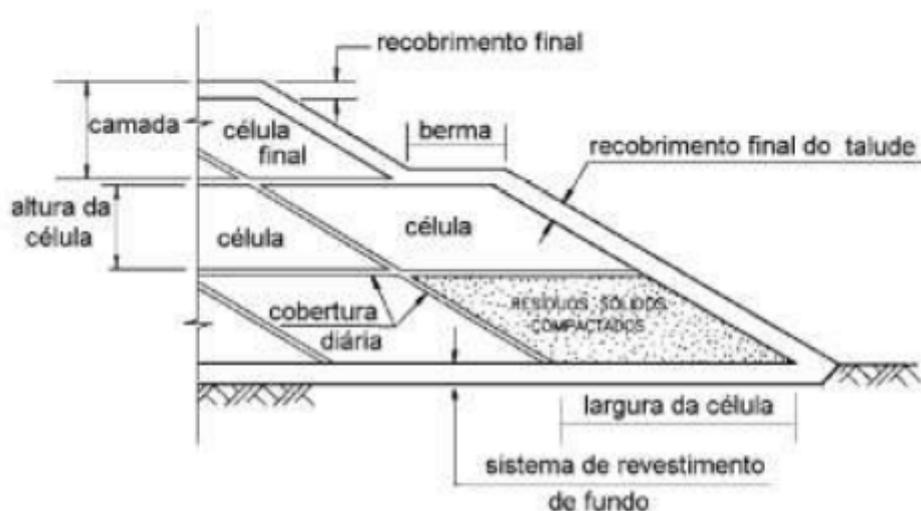
Os resíduos são dispostos compactados, para reduzir o volume e melhorar as propriedades mecânicas do maciço, sendo diariamente cobertos com material menos nobre para proteção sanitária. A questão da necessidade de implantação dos recobrimentos intermediários é frequentemente debatida. É muito questionado o volume perdido do aterro por ocupação das camadas de solo argiloso (cobertura intermediária), esta cobertura diária representa um percentual significativo do volume do maciço sanitário (cerca de 30%), constituindo-se em um custo significativo para sua implantação, chegando a 30% do custo global do aterro (ENGEORPS, 1996 apud OLIVEIRA, 2002).

Outra desvantagem é que causa descontinuidade na permeabilidade vertical do depósito, podendo gerar bolsões de líquidos e gases. No entanto, como vantagem, evita o carreamento de material particulado pelo vento, a geração de odores, a proliferação de vetores, o contato de seres humanos e animais com os

resíduos. Uma alternativa para o uso de coberturas diárias é a utilização de mantas, lonas ou geossintéticos, sobre os resíduos, no final das atividades diárias, e posteriormente retirados nos dias seguintes (SILVA, 2004 apud BOSCOV, 2008).

A Figura 10 mostra através de um esquema técnico as camadas de coberturas de um aterro sanitário.

Figura 10 – Detalhes dos tipos de coberturas



Fonte: (ENGECORPS, 1996 apud Carvalho, 1999)

## 4 METODOLOGIA: DIMENSIONAMENTOS E RESULTADOS

### 4.1 Determinação da geometria do aterro

Uma das primeiras etapas no momento do dimensionamento do aterro, é o dimensionamento da geometria. No caso de aterros de municípios de pequeno porte, devido à pequena quantidade de resíduos gerados, quando comparado com grandes cidades, o mais comum é dimensionar trincheiras para armazenar os resíduos. Para dimensionar a trincheira é necessário saber a quantidade de resíduo a ser destinado ao aterro ao longo da sua vida útil.

Para isso, as primeiras informações necessárias estão associadas à quantidade de pessoas que irão habitar a cidade de Martinópolis durante o período de vigência do aterro sanitário, a taxa de geração de RSU per capita e ao próprio tempo de vida útil do aterro.

A taxa de geração per capita de resíduos cresce anualmente. Para calcular a taxa de crescimento da geração de resíduos de Martinópolis utilizou-se a seguinte equação:

$$G = G_0 (1 + j)^t \quad (6)$$

Onde,

$G$  = Geração de RSU per capita a ser encontrada após um determinado tempo

$G_0$  = Geração de RSU per capita inicial

$j$  = Taxa de crescimento da geração de RSU

$t$  = Diferença em anos entre as taxas  $G_0$  e  $G$

Através da ABRELPE (2020) obtemos os seguintes dados para a geração do estado do Ceará:

$$G_{0(2010)} = 324,6 \text{ KG / HAB / ANO}$$

$$G_{(2019)} = 347,1 \text{ KG / HAB / ANO}$$

$$t = 9 \text{ anos}$$

Dessa forma, chegamos a uma taxa de crescimento anual na geração de resíduos de:

$$j = 0,74\%$$

A partir dos dados populacionais do IBGE de 2000 e 2010, e através do uso do método aritmético (que foi o que mais se aproximou da estimativa do IBGE para o ano de 2021) foi feita uma estimativa populacional durante a vida útil do aterro.

$$P_t = P_0 + K_a(t - t_0)$$

Onde,

$$t = 2010$$

$$t_0 = 2000$$

$$P_{0(2000)} = 8602 \text{ pessoas}$$

$$P_{(2010)} = 10220 \text{ pessoas}$$

Resultando em uma taxa de crescimento populacional linear ( $K_a$ ) de 161,8 pessoas por ano.

A Tabela 8 foi construída também, através das seguintes informações:

- a) Vida útil do aterro = 15 anos
- b) Geração de resíduo por habitante em 2019 = 347,1 kg/hab/dia
- c) Peso específico do RSU = 7 kN/m<sup>3</sup>

Tabela 8 - Volume de RSU a serem gerados pela população de Martinópolis

Martinópolis				
Ano	População	Geração de RSU per capita	Peso (kg/ano)	V (m³)
2023	12323	357,59	4.406.558,63	6.175,48
2024	12485	360,26	4.497.837,64	6.303,40
2025	12647	362,95	4.590.234,46	6.432,89
2026	12808	365,66	4.683.395,04	6.563,44
2027	12970	368,39	4.778.059,70	6.696,11
2028	13132	371,15	4.873.877,31	6.830,39
2029	13294	373,92	4.970.859,82	6.966,30
2030	13456	376,71	5.069.019,28	7.103,87
2031	13617	379,52	5.167.988,33	7.242,57
2032	13779	382,36	5.268.535,49	7.383,48
2033	13941	385,22	5.370.296,44	7.526,09
2034	14103	388,09	5.473.283,72	7.670,42
2035	14265	390,99	5.577.509,95	7.816,48
2036	14426	393,91	5.682.594,00	7.963,75
2037	14588	396,86	5.789.333,63	8.113,34
TOTAL			76.199.383,46	106.787,99

Fonte: Autor.

Através desse volume é possível estimar as dimensões da trincheira e área em planta que será destinada para o recebimento dos resíduos.

Por questões estruturais, para uma maior estabilidade e para garantir uma melhor operação do aterro durante o seu funcionamento e implementação, a trincheira dimensionada terá o formato de um tronco de pirâmide invertido.

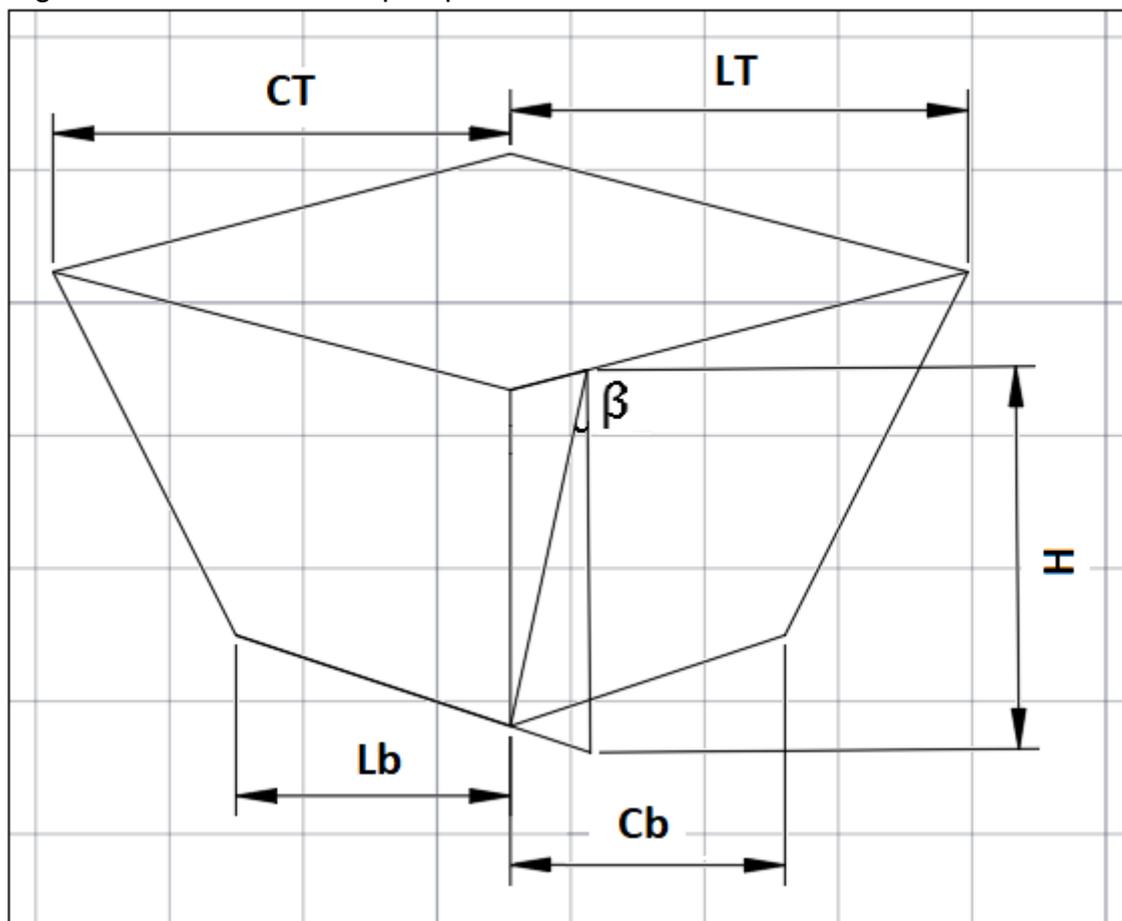
As dimensões que compõem o tronco são a área da base ( $A_b$ ), que possui um comprimento de base ( $C_b$ ) e uma largura de base ( $L_b$ ), uma área de topo ( $A_T$ ) que possui por sua vez, um comprimento de topo ( $C_T$ ) e uma largura de topo ( $L_T$ ), além disso tem-se uma altura ( $H$ ).

Para este projeto em específico optou-se por arbitrar duas dimensões e o ângulo de inclinação do talude para se encontrar a geometria da trincheira:

- a) A altura da trincheira ( $H$ ) = 5 m
- b) A largura de topo = 50 m
- c) A inclinação dos taludes da trincheira ( $\beta$ ) =  $45^\circ$  ou 1:1

Na Figura 11 tem-se o esquema da trincheira com suas respectivas variáveis:

Figura 11 - Geometria em perspectiva da trincheira



Fonte: Autor.

Com base no volume obtido e através dos seguintes dados de projeto, sabe-se que é necessário encontrar os valores de  $CT$  (comprimento de topo) e  $Cb$  (comprimento de base). Até o momento se tem:

$$V = \text{Volume da cava} = 107.000 \text{ m}^3$$

$$H = \text{Altura da cava} = 5 \text{ m}$$

$$\beta = \text{Inclinação dos taludes} = 1:1 (45^\circ)$$

$CT$  = Comprimento de topo = ?

$LT$  = Largura de topo = 50 m

$Cb$  = Comprimento de base = ?

$Lb$  = Largura de base = 40 m

Para uma inclinação de  $45^\circ$  ( $\beta$ ), é possível inferir:

$$Cb = CT - 10$$

$$Lb = LT - 10$$

Através da fórmula do volume do tronco de pirâmide chega-se no comprimento de topo que é função do comprimento da base:

$$V = \frac{1}{3} \times (AT + \sqrt{AT \times Ab} + Ab) \quad (7)$$

Onde,

$AT$  = Área de topo da trincheira

$Ab$  = Área de base da trincheira

Reformulando a Equação 7:

$$V = \frac{1}{3} \times ((CT \times LT) + \sqrt{(CT \times LT) \times (Cb \times Lb)} + (Cb \times Lb))$$

$$V = \frac{1}{3} \times ((CT \times 50) + \sqrt{(CT \times 50) \times ((CT - 10) \times 40)} + ((CT - 10) \times 40))$$

Aplicando os dados na Equação 7 reformulada. obtém-se:

$$CT = 484,4 \text{ m}$$

$$Cb = CT - 10$$

$$Cb = 474,4 \text{ m}$$

## **4.2 Sistema de drenagem**

### ***4.2.1 Estimativa da quantidade de percolado gerado***

Primeiramente, para o dimensionamento do sistema de coleta do percolado (sistema de drenagem interno do aterro), é necessário estimar a vazão de percolado gerado. Para esta estimativa, será utilizado o método empírico Suíço devido a sua simplicidade de cálculo e aos poucos parâmetros climatológicos disponíveis.

O peso específico do RSU do aterro sanitário de Martinópolis foi estimado em  $7,0 \text{ kN/m}^3$ , por ser um aterro de pequeno porte e seus resíduos serem fracamente compactados conforme a Tabela 6. Logo, de acordo com o método suíço, 25% da média anual de chuva se tornará em percolado (Tabela 6). Para se ter uma maior segurança foi adotado um fator de segurança de 3. Nesse método um dos dados cruciais é a média de precipitação de chuva da região, a Tabela 9 foi obtida da FUNCEME de onde foi retirada essa informação:

Tabela 9 - Precipitação média anual histórica de 20 anos da cidade de Martinópolis

Ano	PRECIPITAÇÃO (mm/ano)
1989	1620,40
1990	651,10
1991	873,40
1992	598,90
1993	536,00
1994	1367,90
1995	1391,20
1996	1124,30
1997	703,90
1998	800,20
1999	1252,40
2000	975,60
2001	796,30
2002	884,10
2003	1240,70
2004	953,70
2005	758,90
2006	1094,40
2007	881,30
2008	1126,60
2009	1318,20
<b>MÉDIA</b>	<b>997,60</b>

Fonte: Funceme (2022)

Seguem os cálculos para estimativa do volume de percolado a ser drenado:

$$A = \text{Área de projeção do aterro} = CT \times LT = 24.250 \text{ m}^2$$

$$P = \text{Precipitação média anual} = 997,6 \text{ L/m}^2$$

Aplicando o método suíço tem-se que 25% do volume de chuva que incide sobre o aterro se tornará percolado:

$$Q_{calc} = \left( \frac{P \times A \times K}{t} \right) \quad (8)$$

$$Q_{calc} = 0,19 \text{ L/s}$$

$$Q_{proj} = Q_{calc} \times FS$$

$$Q_{proj} = Q_{calc} \times 3$$

$$Q_{proj} = 0,57 \text{ L/s}$$

#### 4.2.2 Projetando o sistema de drenagem de percolado

Após a determinação do volume de percolado gerado pelo aterro sanitário a ser considerado no projeto, procede-se para o dimensionamento dos dispositivos de drenagem.

O sistema de drenagem de percolado adotado foi um tapete drenante no terreno utilizando brita 3 e 2. A declividade do terreno será assumida como de 2% pois é o valor mínimo estabelecido por norma (ABNT, 2010).

A equação para determinação da área da seção transversal do sistema é dada pela lei de Darcy:

$$Q_{proj} = K \times i \times A \quad (9)$$

Onde,

$K$  = Coeficiente de condutividade hidráulico

$i$  = Gradiente hidráulico

$A$  = Área da seção transversal do tapete drenante

Para se estimar a área transversal do tapete drenante, consideramos a vazão de projeto ( $Q_{proj}$ ) = 0,57 L/s, o gradiente hidráulico ( $i$ ) = 0,02 e o coeficiente de condutividade hidráulico ( $K$ ) = 0,35 m/s (DNIT, 2006); obtendo-se uma área de seção transversal do dreno ( $A$ ) = 0,08142 m<sup>2</sup>.

Considerando que a seção transversal do tapete possui uma área retangular, e que uma das dimensões já é conhecida ( $Lb$ ), a determinação da altura do tapete é obtida dividindo a área calculada pela largura do tapete, sendo igual a 0,002 m ou 2 mm. Por questão de segurança, será adotado um tapete drenante de 0,1 m ou 100 mm de altura.

O tapete drenante irá conduzir o percolado através de uma tubulação (tubo liso) para fora da trincheira para um reservatório subterrâneo, onde o lixiviado posteriormente será bombeado para um sistema de tratamento/armazenamento.

Para o dimensionamento do dreno (tubo liso) podemos utilizar a equação da continuidade:

$$Q = V \times A \quad (10)$$

De acordo com JUNIOR (2003), a velocidade aceitável de propagação do percolado nos drenos está entre 1 e 5 m/s, por este motivo será utilizada a velocidade de 2 m/s. Já que  $Q_{proj} = 0,59$  L/s e  $V = 2$  m/s, então  $A = 0,000295$  m<sup>2</sup>.

Como  $A = \pi \times r^2$ , então  $r = 0,017$  m ou 17 mm. Por questões comerciais e de segurança de projeto e para facilitar eventual manutenção, o diâmetro adotado do dreno posicionado na cota mais baixa da trincheira, será de 100 mm, suficiente para conduzir a vazão do chorume.

### **4.3 Dimensionamento do sistema de impermeabilização**

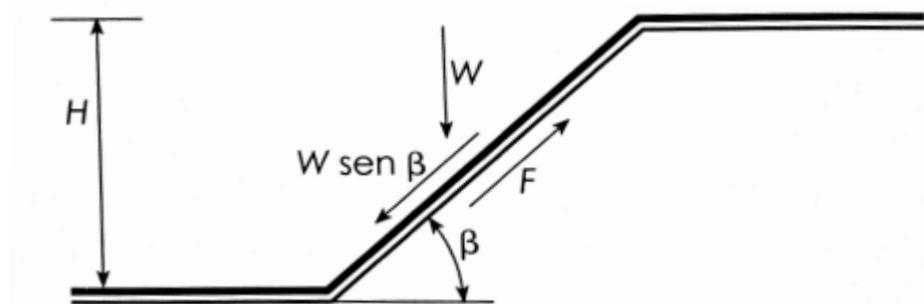
O sistema de impermeabilização será composto por uma camada dupla impermeabilizante composta por uma camada de 60 cm de solo local compactado conforme as orientações da ABNT NBR 15849:2010, obtido na realização do corte do terreno natural e de uma camada de geomembrana PEAD. O solo deverá ser compactado em 3 camadas de 20 cm.

Para dimensionar a geomembrana primeiro é necessário conhecer os diferentes esforços que a mesma estará submetida durante a fase de instalação e operação. Dentre os esforços pode-se citar: tensões devido ao peso próprio, tensões devido a recalques diferenciais, tensões devido ao puncionamento estático e tensões devido ao puncionamento dinâmico. A seguir serão apresentados os diferentes dimensionamentos dos esforços sofridos pela geomembrana.

### 4.3.2 Esforços devido ao peso próprio

O esquema abaixo representa as forças atuantes na geomembrana devido às tensões sofridas pelo peso próprio.

Figura 12 - Tensões devido ao peso próprio



Fonte: Vertematti (2015)

O peso próprio por metro linear de membrana é expresso pela Equação 11 (VERTEMATTI, 2015):

$$W = Y_{GM} t \frac{H}{\text{sen}\beta} \quad (11)$$

Onde,

$Y_{GM}$  = peso específico da geomembrana

$t$  = espessura da geomembrana

$H$  = altura do talude

$\beta$  = ângulo de inclinação do talude

$\sigma_{Ta}$  = tensão de tração atuante na geomembrana

$\delta$  = ângulo de atrito entre a geomembrana e o material de fundação

Como a inclinação dos taludes e a altura da trincheira foram arbitradas e como as geomembranas PEAD recomendadas em projetos de aterros sanitários, (CEMPRE,2010) possuem uma densidade característica de  $\gamma_{GM}$ , tem-se:

$$\beta = 45^\circ;$$

$$\gamma_{GM} = 0,94 \text{ g/cm}^3$$

$$H = 5 \text{ m}$$

Aplicando a Equação 11, tem-se:

$$W = 66,47 \text{ kPa.t}$$

Através da Equação 12 será calculada a tensão de tração através do peso próprio na geomembrana:

$$\sigma_{TA} = \frac{W \operatorname{sen} \beta - W \operatorname{cos} \beta . t g \delta}{t} \quad (12)$$

Onde,

$\sigma_{TA}$  = Tensão atuante na geomembrana

Aplicando a Equação 12, tem-se:

$$\sigma_{TA} = 34,41 \text{ kPa}$$

Com esses valores, é possível consultar nos catálogos das fabricantes a melhor geomembrana como no exemplo abaixo, onde foi utilizado o catálogo da Maccaferri (2021) sobre geomembranas PEAD:

Tabela 10 - Catálogo de membranas PEAD da MACCAFERRI (2021)

Propriedades físicas			80	100	150	200
Espessura (média mínima)	ASTM D5199	mm	0,8	1	1,5	2
Densidade (mín.)	ASTM D1505	g/cm³	0,94			
Teor de negro de fumo	ASTM D4218	%	2-3			
Dispersão de negro de fumo	ASTM D5596	categoria	1-2			
Propriedades mecânicas			80	100	150	200
Resistência a tração no escoamento	ASTM D6693	kN/m	11	15	22	29
Alongamento no escoamento		%	12	12	12	12
Resistência a tração na ruptura		kPa	27000	27000	26666,67	26500
Alongamento na ruptura		%	700	700	700	700
Resistência ao rasgo	ASTM D1004	N	100	125	187	249
Resistência ao puncionamento	ASTM D4833	N	256	320	480	640
Apresentação do rolo			80	100	150	200
Largura		m	5,9	5,9	5,6	5
Comprimento		m	140	120	80	50

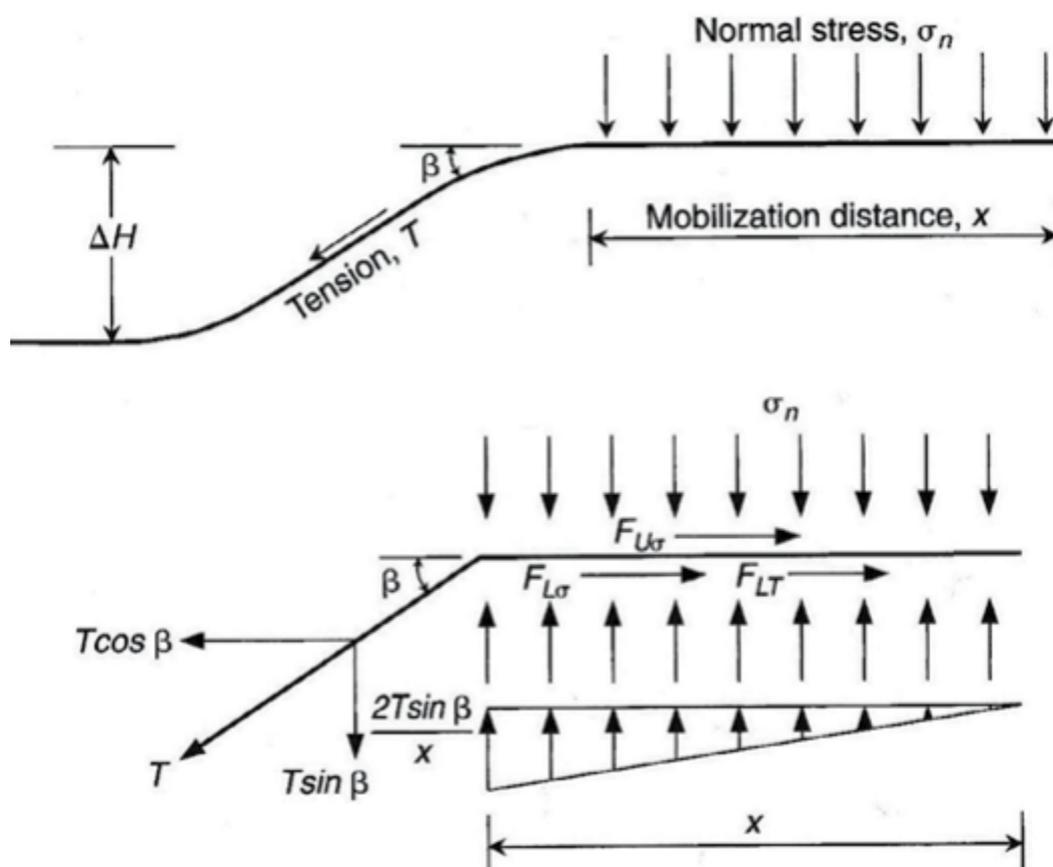
Fonte: MACCAFERRI (2021) adaptada pelo autor.

Através do catálogo da Maccaferri, é possível notar que as membranas do tipo PEAD possuem uma resistência à tração na ruptura muito superior ao encontrado acima e portanto, aptas a serem aplicadas ao projeto.

#### 4.3.3 Esforços devido a recalques diferenciais

Uma possibilidade da qual deve se estar sempre ciente acerca do esforço sofrido pelo solo de fundação e arraste da geomembrana, se trata de recalques promovidos pela movimentação do resíduo estocado, da camada de proteção, ou do solo de cobertura. A Figura 13 retrata esses esforços:

Figura 13 - Tensão na geomembrana devido aos recalques



Fonte: Koerner (2012)

Conhecendo esses esforços é possível concluir uma espessura mínima para a geomembrana. Para se definir a espessura da geomembrana, será utilizada a Equação 13, proposta por Koerner (2012):

$$t = \frac{\sigma_n x (tg\delta u + tg\delta L)}{(\sigma_{adm}/FS) * (\cos\beta - \sin\beta \cdot tg\delta L)} \quad (13)$$

Onde,

$t$  = Espessura em milímetros

$\sigma_n$  = Tensão na geomembrana a partir do peso do material estocado

$\beta$  = ângulo de subsidência (0° a 60°)

$\delta L$  = ângulo de atrito entre a geomembrana e o material inferior

$\delta u$  = ângulo de atrito entre a geomembrana e o material superior

$x$  = comprimento de mobilização (definido em função das tensões normais)

$FS$  = Fator de segurança de projeto

A partir da fórmula acima e dos valores abaixo, pode-se obter a tensão atuante sobre a geomembrana:

$$\sigma_n = H_1 \times \gamma_1 + H_2 \times \gamma_2 + H_3 \times \gamma_3 + H_4 \times \gamma_4 + H_5 \times \gamma_5$$

Onde,

$H_1 = 5,0 \text{ m} * 0,7 = 3,5 \text{ m}$  (participação do RSU na altura do aterro

considerando o recalque)

$H_2 = 0,5 \text{ m}$  (cobertura intermediária)

$H_3 = 0,5 \text{ m}$  (cobertura vegetal / final)

$H_4 = 0,1 \text{ m}$  (tapete drenante)

$H_5 = 0,1 \text{ m}$  (camada de solo filtrante)

$\gamma_1 = 10,0 \text{ kN/m}^3$  (após recalque do resíduo)

$\gamma_2 = 17 \text{ kN/m}^3$  (cobertura intermediária)

$\gamma_3 = 16 \text{ kN/m}^3$  (cobertura vegetal / final)

$$\gamma_4 = 21 \text{ kN/m}^3 \text{ (tapete drenante)}$$

$$\gamma_5 = 19 \text{ kN/m}^3 \text{ (camada de solo filtrante)}$$

$$\sigma_n = 55,5 \text{ kPa};$$

$$\sigma_{adm} = 27000 \text{ kPa (tensão admissível usual em geomembranas);}$$

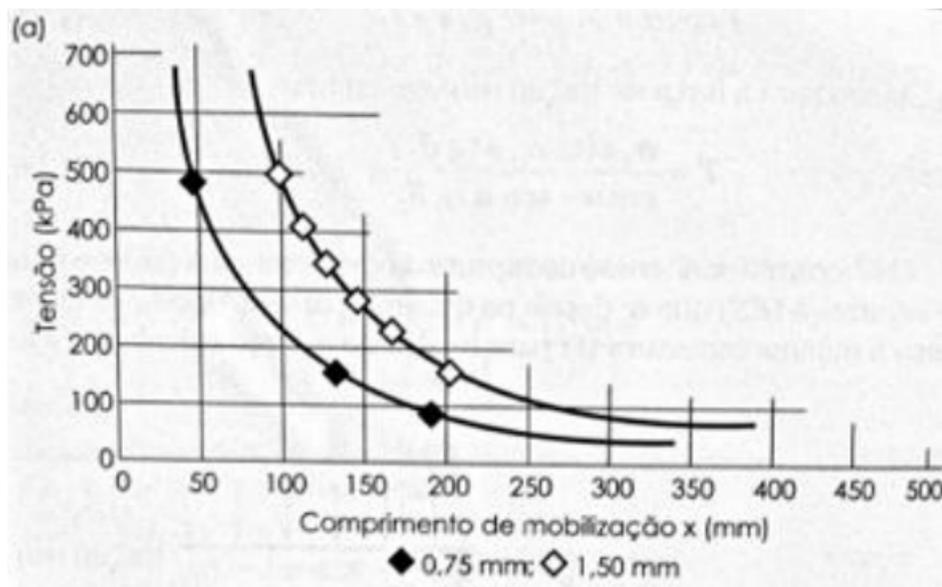
$$\delta L = 10^\circ;$$

$$\delta u = 18^\circ;$$

Arbitrando inicialmente uma membrana PEAD de 1,5 mm de espessura, da Figura 14 podemos extrair o comprimento de mobilização ( $x$ ) = 0,4 m

$$FS = 2 \text{ (fator de segurança adotado para o projeto)}$$

Figura 14 - Relação tensão e comprimento de mobilização em membranas PEAD



Fonte: VERTEMATTI (2015)

Aplicando a Equação 13, obtém-se:

$$t_{(Proj)} = 0,00124 \text{ m ou } 1,24 \text{ mm (usa-se } 1,5 \text{ mm)}$$

Aplicado o fator de segurança, a próxima espessura superior disponibilizada em catálogo é de 1,5 mm. Por isso, adota-se uma espessura de 1,5 mm para a geomembrana.

#### 4.3.4 Esforço devido ao puncionamento estático

Outra solicitação que deve-se estar atento quanto à geomembrana, se trata da força de perfuração que o geotêxtil pode sofrer por carga estática dos elementos enclausurados. Através da Equação 14 é possível definir o puncionamento estático de projeto (Koerner, 2012):

$$F_{req} = p' d_{50}^2 S_1 S_2 S_3 \quad (14)$$

Onde,

$F_{req}$  = Força de perfuração que a geomembrana deve resistir

$p'$  = Pressão que incide sobre a geomembrana

$d_{50}^2$  = Diâmetro médio dos grãos ou objetos contundentes

$S_1$  = Fator de penetração

$S_2$  = Fator de equivalência (laboratório / campo)

$S_3$  = Fator de ajuste (forma plana do elemento)

Dado que a pressão aplicada sobre a geomembrana pelas camadas de resíduos e de coberturas ( $p'$ ) = 55 kPa, o diâmetro médio dos grão em contato com a geomembrana  $d_{50}^2$  = 60mm, e que a tabela abaixo demonstra os valores de S1, S2 e S3 recomendados a serem adotados no projeto (Koerner, 2012), é possível determinar a tensão devido ao puncionamento estático.

Tabela 11 - Valores recomendados para os dados de S1,S2 e S3

Objeto Perfurante	S1	S2	S3
Pontiagudo e relativamente grande	0,9	0,8	0,9
Pontiagudo e relativamente pequeno	0,6	0,6	0,7
Subarredondado e relativamente grande	0,7	0,6	0,6
Subarredondado e relativamente pequeno	0,4	0,4	0,5
Arredondado e relativamente grande	0,5	0,4	0,4
Arredondado e relativamente pequeno	0,2	0,2	0,3

Fonte: (KOERNER, 2012)

$$F_{req} = 55 \times 0,06^2 \times 0,5 \times 0,4 \times 0,4$$

$$F_{req} = 0,01584 \text{ kN ou } 15,84 \text{ N}$$

Após se levar em consideração os fatores de segurança, obtém-se:

$$F_{adm} = FR_{perf} \times FS_{perf} \times F_{rec} \quad (15)$$

Onde,

$F_{adm}$  = Resistência à perfuração admissível

$F_{req}$  = Resistência à perfuração localizada obtida

$FR_{perf}$  = Fator de redução da resistência à perfuração ( $\geq 2,0$ )

$FS_{perf}$  = Fator de segurança contra a ruptura por puncionamento geotêxtil  
( $\geq 2,0$ )

Aplicando a Equação 15 obtém-se:

$$F_{adm} = 15,84 \times 3 \times 2$$

$$F_{adm} = 95,04 \text{ N}$$

#### 4.3.5 Esforço devido ao puncionamento dinâmico

Esforço devido ao puncionamento dinâmico nada mais é do que o esforço sofrido pelo solo de fundação ao despejo dos materiais, no caso aterro, principalmente durante a sua instalação.

Para o cálculo do puncionamento dinâmico, é necessário calcular a energia transferida por um objeto à membrana. Para isso, será utilizada a Equação 16 (Koerner, 2012):

$$E = 13,35 \times 10^{-6} d_0^3 h \quad (16)$$

Onde,

$E$  = Energia transferida de um objeto cadente ao geotêxtil (Joules)

$d_0$  = Diâmetro máximo do objeto (mm)

$h$  = Altura de queda (m)

$$E = 13,35 \times 10^{-6} \times 200^3 \times 2$$

$$E = 213,6 \text{ J}$$

$$E_{req} = \frac{E}{f_{imp}} \quad (17)$$

Onde,

$E_{req}$  = Energia de impacto requerida

$f_{imp}$  = Fator de minoração (gráfico a seguir, em função do CBR)

Supondo que o solo de fundação se trata de uma argila comprimida (CL), é possível arbitrar através dos dados da Tabela 12 que o CBR é de 5%.

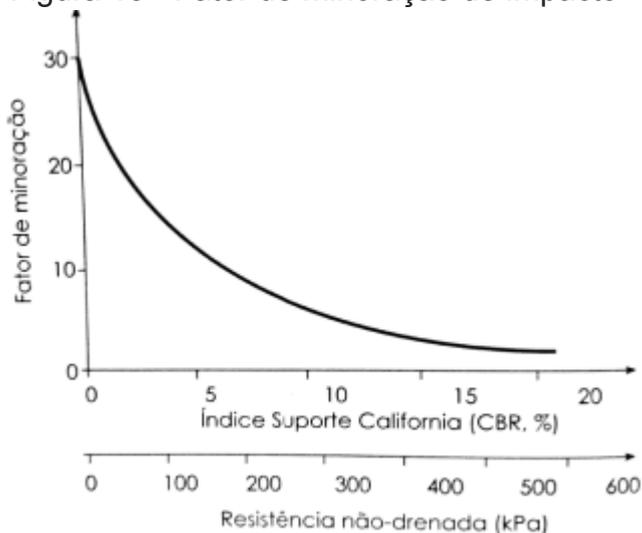
Tabela 12 - CBR provável por tipo de solo

Solo (Classificação Unificada)	CBR provável (%)
GW	40 a 80 (ou mais)
GP	30 a 60 (ou mais)
GM	20 a 60
GC e SW	20 a 40
SP e SM	10 a 40
SC	5 a 20
ML, CL e CH	2 (ou menos) a 15
MH	2 (ou menos) a 10
OL e OH	2 (ou menos) a 5

Fonte: Wlastermiler (1997)

Logo, através da Figura 15 é possível determinar o fator de minoração do solo.

Figura 15 - Fator de minoração de impacto



Fonte: VERTEMATTI (2015)

$$E_{req} = \frac{213,6}{11,5}$$

$$E_{req} = 18,57$$

Adicionando os fatores de segurança:

$$E_{adm} = E_{ensaio} \geq FS_{imp} E_{req} \quad (18)$$

$$E_{adm} = 18,57 * 3 * 2$$

$$E_{adm} = 111,44 \text{ J}$$

Por fim, temos que a Tabela 13 que demonstra os dados de projeto confrontados com os dados da geomembrana escolhida através do catálogo da MACCAFERRI (2021)

Tabela 13 - dados da geomembrana do projeto

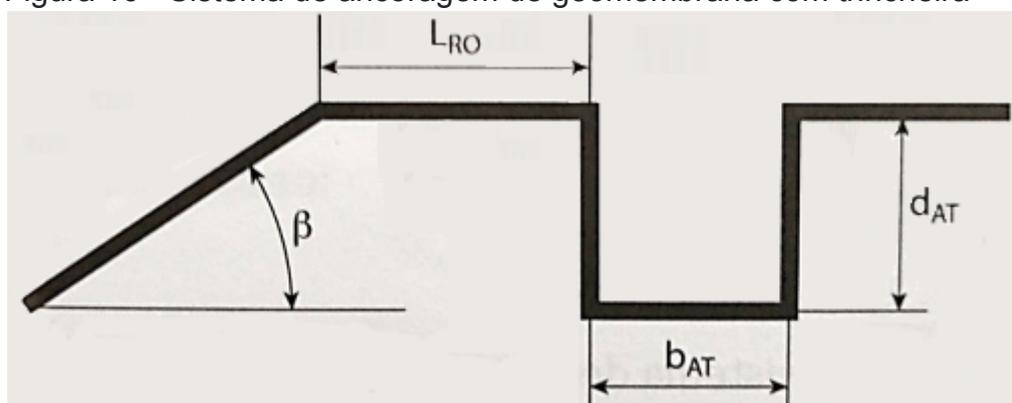
Comparação de dados de projeto com catálogo de geomembranas		
Parâmetro	Projeto	Geomembrana escolhida
Espessura da geomembrana (t)	1,24 mm	1,5 mm
Tensões devido ao peso próprio	34,41 kPa	$\leq 26.666,67 \text{ kPa}$
Tensão de puncionamento estático	95,04 N	$\leq 640 \text{ N}$
Tensão de puncionamento dinâmico	55,72 N	Não encontrado no catálogo da Maccaferri

Fonte: Autor.

#### 4.3.6 Comprimento de ancoragem

Para garantir a fixação da geomembrana nos taludes da trincheira, e garantir que a mesma não irá deslizar, deve-se determinar um comprimento de ancoragem baseado nas forças atuantes na geomembrana no topo do talude.

Figura 16 - Sistema de ancoragem de geomembrana com trincheira



Fonte: Autor

O comprimento de ancoragem simples será dado pela fórmula (Koerner, 2012):

$$L_{RO} = \frac{T_{adm}(\cos\beta - \operatorname{sen}\beta \cdot \operatorname{tg}\delta L)}{\sigma_n(\operatorname{tg}\delta u + \operatorname{tg}\delta L)} \quad (19)$$

Onde,

$L_{ro}$  = Comprimento de ancoragem (m)

$\sigma_{adm}$  = Tensão admissível da geomembrana = 26.666,67 kPa

$T_{adm}$  = Força de tração admissível da geomembrana =  $\sigma_{adm} * 0,002 \text{ m} = 40 \text{ kN/m}$

$\beta$  = ângulo de inclinação do talude = 45° (Talude 1H:1V)

$\sigma_n$  = 16 kN/m<sup>3</sup> \* 0,5 m = 8 kPa

Ângulo de atrito entre a geomembrana e o material de fundição ( $\delta L$ ) = 15°;

Ângulo de atrito entre a geomembrana e o material superior ( $\delta u$ ) = 15°;

Aplicando a Equação 19:

$$L_{RO} = \frac{40 (\cos 45 - \operatorname{sen} 45 \cdot \operatorname{tg} 15)}{8 (\operatorname{tg} 15 + \operatorname{tg} 15)}$$

$$L_{RO} = 4,254 \text{ m}$$

Para uma maior segurança, decidiu-se adicionar uma trincheira a ancoragem simples com as seguintes dimensões:

$d_{AT}$  = 30 centímetros de profundidade

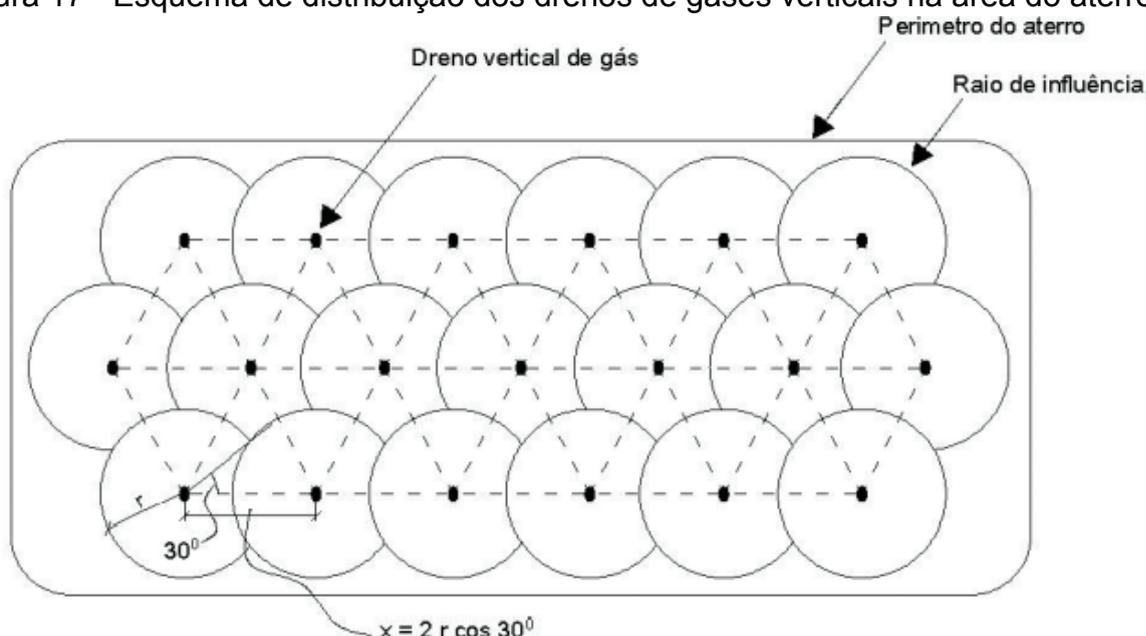
$b_{AT}$  = 30 centímetros de largura de fundo

#### 4.4 Sistema de drenagem de gases

Para dimensionar os drenos verticais, podem-se utilizar equações de fluxo de fluidos (neste caso um gás) em meios porosos (brita) ou mesmo em tubulações. Porém, normalmente, adota-se um dimensionamento empírico do sistema vertical de drenos. Sendo assim, os drenos verticais possuem em geral diâmetros que variam de 50 cm a 100 cm, sendo preenchidos com rocha brita 3, 4 ou 5. Aterros com maiores dimensões e maiores alturas podem possuir drenos verticais de até 150 cm de diâmetro. (RECESA, 2008)

No projeto, a distribuição dos drenos no terreno deve ser feita através da sobreposição dos raios de atuação dos drenos verticais, ou de captação de gás, que pode variar de 15 a 30 m. Sugere-se que quanto maior for a altura do aterro, menor seja o raio de atuação dos drenos verticais.

Figura 17 - Esquema de distribuição dos drenos de gases verticais na área do aterro



Fonte: (RECESA, 2008)

Para o projeto em específico será adotado o raio de 30 m, que ao aplicar a fórmula  $X = 2 * r * \cos 30^\circ$ , nos dá um espaçamento entre os drenos (X) de 51,96 m. Como o terreno possui 40 metros de largura de fundo (Lb), e 465 metros de comprimento de fundo (Cb), basta dividir a largura de fundo (Lb) pela componente de (X) no eixo de Lb (y) a partir da vista superior do aterro para se chegar a

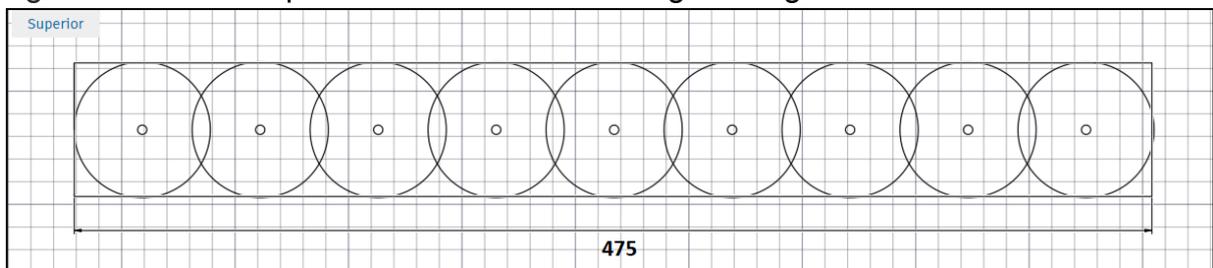
conclusão da quantidade de drenos nesse eixo e repetir o processo para o comprimento de fundo ( $C_b$ ) do aterro.

Onde, a partir da vista superior do aterro (Figura 18) tem-se:

Quantidade de drenos no eixo  $y = 40 \text{ m} / (51,96 \cdot \cos(60/2)) = 0,88$  (Usa-se 1)

Quantidade de drenos no eixo  $x = 475 \text{ m} / 51,96 = 9,14$  (Usa-se 9)

Figura 18 - Visão superior do sistema de drenagem de gases



Fonte: Autor.

#### 4.5 Calhas de escoamento superficial

Para se dimensionar as calhas de escoamento superficial, primeiro é necessário saber o tempo de concentração da chuva da área. Baseado na experiência brasileira, RIBEIRO (1961) propõe:

$$t = \frac{16 \times L}{(1,05 - 0,2 \times P)(100 \times S)^{0,04}} \quad (20)$$

Onde,

$t$  = Tempo de concentração / chuva (min)

$L$  = Distância máxima a ser percorrida por uma partícula (km)

$P$  = Porcentagem da bacia coberta pela vegetação (%)

$S$  = Declividade média (m/m)

Aplicando a Equação 20:

$$t = \frac{16 \times 0,485}{(1,05 - 0,2 \times 0,8)(100 \times 0,01)^{0,04}}$$

$$t = 8,719 \text{ min}$$

Com o tempo de concentração em minutos é possível descobrir a intensidade de chuva, e para isso será utilizada a equação de intensidade de chuva para Fortaleza proposta por OSNY (2012):

$$i = \frac{2345,29 \times T^{0,173}}{(t+28,31)^{0,904}} \quad (21)$$

Onde,

$i$  = Intensidade de chuva (mm/h)

$t$  = Tempo de concentração / chuva (min)

$T$  = Tempo de retorno (anos)

Para determinação do tempo de retorno, foi utilizada a recomendação da ABNT NBR 15849:2010, que diz que a implantação de sistemas de drenagem de águas pluviais deve ser capaz de suportar uma chuva com períodos de recorrência equivalentes ao da vida útil do aterro sanitário de pequeno porte. Assim, foi adotada como tempo de retorno a somatória do tempo necessário para encerramento das atividades operacionais do aterro, de 15 anos, mais o tempo necessário para a degradação da matéria biodegradável, de 20 anos, totalizando 35 anos de tempo de retorno.

Aplicando a Equação 21:

$$i = \frac{2345,29 \times 35^{0,173}}{(8,719+28,31)^{0,904}}$$

$$i = 165,71 \text{ mm/h}$$

A partir do método racional, proposto por Mulvaney em 1851, é possível chegar na vazão aplicada ao aterro a partir desta intensidade de chuva:

$$Q = 0,278 \times C \times I \times A \quad (22)$$

Onde,

$Q$  = Vazão de projeto ( $m^3 / s$ )

$C$  = Coeficiente de escoamento superficial

$I$  = Intensidade de chuva (mm/h)

$A$  = Área do aterro (km)

Do quadro 1 foi retirado o coeficiente de escoamento superficial ( $C = 0,15$ ) por se tratar de uma região afastada da cidade, coberta por vegetação em sua fase final.

Quadro 1 - Coeficientes de escoamento superficial

Ocupação do solo	C
Edificação muito densa: partes centrais densamente construídas de uma cidade com ruas e calçadas pavimentadas	0,70 a 0,95
Edificação não muito densa: partes adjacentes ao centro de menor densidade de habitações, mas com ruas calçadas e pavimentadas	0,60 a 0,70
Edificação com poucas superfícies livres: partes residenciais com construções cerradas, ruas pavimentadas	0,50 a 0,60
Edificação com muitas superfícies livres: partes residenciais com ruas pavimentadas, mas com muitas áreas verdes	0,25 a 0,50
Subúrbios com alguma pavimentação: partes de arredores e subúrbios com pequena densidade de construções	0,10 a 0,25
Matas, parques e campos de esportes: partes rurais, áreas verdes, superfícies arborizadas, parques ajardinados e campos de esporte sem pavimentação	0,05 a 0,20

Fonte: Tucci et al. (1995)

Aplicando a Equação 22, obtém-se:

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

$$Q = 0,278 \times 0,125 \times 165,71 \times 24,25$$

$$Q_{proj} = 0,13964 \text{ m}^3/\text{s}$$

Através da fórmula de Manning é possível determinar o raio da calha que possui o formato de um semicírculo:

$$Q = S \times V \quad (23)$$

$$Q = \frac{\pi r^2}{2} \times \frac{\sqrt[3]{R^2} \times \sqrt{I}}{n}$$

$$Q = \frac{\pi r^2}{2} \times \frac{\sqrt[3]{\frac{r^2}{2}} \times \sqrt{I}}{n}$$

Onde,

$Q$  = Vazão de projeto = 0,13964 m<sup>3</sup>/s

$V$  = Velocidade (m/s)

$S$  = Seção do semicírculo (m<sup>2</sup>)

$I$  = Declividade (m/m) = 1 m / 100 m

$n$  = Coeficiente de rugosidade = 0,013 (Concreto)

$R$  = Raio hidráulico (m)

$r$  = Raio do semicírculo (m)

Aplicando a Equação 23, obtém-se o valor do raio da calha ( $r$ ):

$$r = 0,3143 \text{ m}$$

Uma calha com essa dimensão possui capacidade para drenar toda a área de topo (AT) de 24.250 m<sup>2</sup> do aterro sanitário, mas como medida de segurança, serão instaladas duas, uma de cada lado do aterro com o objetivo de drenar ao máximo o escoamento superficial.

## 5 CONCLUSÃO

O aterro sanitário se dispõe como um projeto de grande impacto social e ambiental do qual solicita inúmeras áreas do conhecimento humano. O objetivo é criar um projeto que venha a minimizar ao máximo possível os impactos causados pela vida humana. Dentre as disposições finais de resíduos, como aterro controlado, e o lixão, o aterro sanitário é o que possui o maior número de técnicas de engenharia e ferramentas para uma melhor gestão do resíduo sólido urbano (RSU).

Contemplando sistemas de impermeabilização, filtração, contenção de odores e vetores, drenagem de percolados, drenagem de gases e escoamento superficial, este projeto se propôs a apresentar importantes etapas que devem ser abordadas no dimensionamento de aterros sanitários de pequenos municípios, reduzindo o impacto que esses resíduos poderiam causar a outras vidas e ao meio ambiente caso fossem descartados na natureza de maneira descontrolada.

O aterro sanitário é uma das opções de disposição final de resíduos sólidos que mais fazem sentido para a realidade brasileira, tendo em vista a vasta disponibilidade de terras que o Brasil possui. Contudo, é necessário que a sociedade brasileira entenda que esse tipo de estrutura na verdade é o mínimo que deve ser feito acerca da poluição ambiental por resíduos sólidos, onde a sociedade já deveria estar refletindo sobre melhorias no processo de destinação, com o objetivo de minimizar a quantidade de resíduos destinados a esse tipo de empreendimento, principalmente através da apropriada separação e reciclagem dos mesmos.

Foi possível com o uso de dados populacionais e de geração per capita de resíduos de um pequeno município do estado do Ceará a determinação das dimensões do aterro bem como a partir da utilização de uma série de dados climatológicos e geotécnicos, baseados em renomadas bibliografias e em normas técnicas vigentes o dimensionamento de sistemas de drenagem, de impermeabilização do solo, de camadas de coberturas, entre outras coisas.

## REFERÊNCIAS

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 **ABNT NBR 10004**. Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT NBR 10005**. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT NBR 10006**. Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004c.

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.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020. 1ª ed. São Paulo. 2021.

BOSCOV, M. E. G. Geotecnia Ambiental. 1ª edição, São Paulo, Editora Oficina de Textos, 2008.

CARVALHO, M. F. Comportamento Geotécnico de Resíduos Sólidos Urbanos. 1999. 250f. Tese (Doutorado)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 1999.

CEMPRE. Lixo municipal. Manual de gerenciamento integrado. 3ª edição, São Paulo, 2008.

CURTY, Edimar Batista. Escolha de uma área para disposição final dos resíduos sólidos urbanos e dimensionamento de um aterro sanitário para a cidade de Campos dos Goytacazes/RJ. UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF. Campo dos Goytacazes, 2005.

DNIT, Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes - Manual de pavimentação. 3.ed. - Rio de Janeiro, 2006.

ENGEORPS – Corpo de Engenheiros Consultores (1996). Rel: 064-SSONOD-B173. Estado da Arte dos Aterros Sanitários – Parte II, abril, 1996.

KOERNER, R. M., Designing With Geosynthetics, 6ed. Prentice Hall Inc., 761 pgs [Upper Saddle River, New Jersey, EUA, 2012].

KÖNIG, D.; JESSBERGER, H.L. Waste Mechanics. In: ISSMFE Technical Committee TC5 on Environmental Geotechnics, 1997.

LAMARE NETO, A. Resistência ao Cisalhamento de Resíduos Sólidos Urbanos e de Materiais Granulares com Fibras. 2004. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006).

MACCAFERRI (2021). Especificação Técnica, MACLINE SDH Geomembrana. [www.maccaferri.com.br](http://www.maccaferri.com.br).

OLIVEIRA, David Américo Fortuna. Estabilidade de taludes de maciços de resíduos sólidos urbanos. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, 2002.

SANTOS, B. T. Estudo sobre a Estabilidade de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos. 2012. TCC (Graduação) – Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro– UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.

SILVA, C.C., 2006 - Estudo de caso de sistemas de tratamento de efluentes domésticos com o uso de indicadores ambientais. 110p. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Universidade Paulista (UNIP), São Paulo.

SILVA, K. T. Projeto de um Aterro Sanitário de Pequeno Porte – Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2016.

SOUZA PINTO, Carlos. Curso Básico de Mecânica do Solos. 3º ed. São Paulo – SP. 2006.

TUCCI, Carlos E. M.; PORTO, Rubem La Laina; BARROS, Mário T. de. Drenagem Urbana. Porto Alegre: ABRH, Editora da Universidade, UFRGS, 1995.

VERTEMATTI, J. C. Manual Brasileiro de Geossintéticos. Associação Brasileira das Indústrias de Não Tecidos e Tecidos Técnicos (ABINT). Editora Edgard Blücher, 2004.

Aterro sanitário de São José recebe nota 10 da Cetesb - Prefeitura de São José dos Campos ([sjc.sp.gov.br](http://sjc.sp.gov.br)) -

<https://www.sjc.sp.gov.br/noticias/2021/julho/28/aterro-sanitario-de-sao-jose-recebe-nota-10-da-cetesb/> - Acesso em: Junho de 2022.