



**CENTRO UNIVERSITÁRIO CHRISTUS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

PEDRO AUGUSTO ARAÚJO MAGALHÃES

**PROPOSTA SIMPLIFICADA DE ATERRO SANITÁRIO PARA O MUNICÍPIO
DE BARRO – CE.**

FORTALEZA

2021

PEDRO AUGUSTO ARAÚJO MAGALHÃES

PROPOSTA SIMPLIFICADA DE ATERRO SANITÁRIO PARA O MUNICÍPIO DE
BARRO – CE.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado ao curso de Engenharia Civil do
Centro Universitário Christus, como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. MSc. Paula Nobre de
Andrade.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Centro Universitário Christus - Unichristus
Gerada automaticamente pelo Sistema de Elaboração de Ficha Catalográfica do
Centro Universitário Christus - Unichristus, com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M188p Magalhães, Pedro Augusto Araújo.
Proposta simplificada de aterro sanitário para o município de
Barro-CE / Pedro Augusto Araújo Magalhães. - 2021.
69 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro
Universitário Christus - Unichristus, Curso de Engenharia Civil,
Fortaleza, 2021.

Orientação: Profa. Ma. Paula Nobre de Andrade.

1. Aterro de pequeno porte. 2. RSU. 3. Barro-CE. I. Título.

CDD 624

PEDRO AUGUSTO ARAÚJO MAGALHÃES

PROPOSTA SIMPLIFICADA DE ATERRO SANITÁRIO PARA O MUNICÍPIO DE
BARRO – CE.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado ao curso de Engenharia Civil do
Centro Universitário Christus, como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Ma. Paula Nobre de
Andrade.

Aprovada em: 12/01/2021.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Ma. Paula Nobre de Andrade (Orientadora)
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

Prof. Me. Nelson de Oliveira Quesado Filho
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

Prof. Me. Euclides Lourenço de Melo Neto
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

AGRADECIMENTOS

À UniChristus, por toda estrutura oferecida. É uma honra fazer parte de uma instituição tão bem conceituada.

Aos meus pais, Milton e Maristela, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado incondicionalmente, apesar da distância. Obrigado por terem sido os responsáveis por tornar a pessoas que eu sou hoje. Todo o meu amor e admiração.

À minha irmã, por tudo que fez e faz por mim, o meu mais sincero obrigado, você é uma pessoa indescritível na minha vida, irmã, mãe e amiga, obrigado por tudo, você é incomparável.

À minha parceira Luana, por sempre estar ao meu lado, mesmo quando achei que não se fazia necessário e me aguentar em todos esses momentos, você é maravilhosa e merece todo amor do mundo, tenho muita sorte de poder compartilhar a vida ao seu lado.

À minha Professora Paula, minha orientadora, por me ajudar desde o início, sendo a pessoa mais solícita e incrível durante todo esse ano, foi um prazer tê-la como orientadora.

Aos membros da banca avaliadora, Nelson de Oliveira e Euclides Lourenço, que disponibilizaram seu tempo para acrescentar suas contribuições ao meu trabalho.

Aos professores do curso de Engenharia Civil da Unichristus, por todo conhecimento transmitido.

RESUMO

A inadequação de disposição final de RSU, expõe a população e o ambiente a vários problemas socioambientais, como a degradação ambiental, aumento dos vetores de doenças relacionadas a problemas sanitários, além de possível exposição direta de agentes nocivos a seres humanos e animais. No Brasil, foi proibido a utilização de lixões e aterros controlados para disposição final de RSU desde 2010, devido a promulgação da lei de Nº 12305/2010. Porém no país foram gerados 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos apenas no ano de 2018. Desse total, 92% (72,7 milhões de toneladas) foi coletada no local de geração enquanto o restante não teve nenhum tipo de coleta ou tratamento adequando, representando um total alarmante de 6,3 milhões de toneladas de RSU não coletados. Além disso, o maior problema a ser observado é a destinação final dos resíduos sólidos coletados, pois apenas 59,5% (43,3 milhões de toneladas) desses tem destinação em aterros sanitários, sendo os outros 40,5% (29,5 milhões de toneladas) despejados em locais impróprios como lixões e aterros controlados. O objetivo desse trabalho é propor um projeto simplificado de aterro sanitário de pequeno porte para o município de Barro – CE seguindo as orientações da NBR 15849/2010. A cidade segue o exemplo de várias cidades de pequeno porte, onde apresentam baixa arrecadação financeira, pouco ou nenhuma infraestrutura em saneamento básico e baixo índice populacional e educacional. Apesar disso seus índices de coleta dos resíduos sólidos urbanos são satisfatórios, porém a destinação final ainda é feita no lixão municipal, gerando diversos problema socioambientais. O aterro sanitário de pequeno porte, é uma boa solução para a problemática da disposição inadequada de resíduos no município, devido a sua simplicidade de construção e de operação, sendo a melhor alternativa para disposição final de resíduos sólidos, em comparação aos lixões e aterros controlados, pois armazena de forma segura os resíduos, minimizando assim os danos causados por eles quando dispostos de forma incorreta.

Palavras-chave: Aterro de pequeno porte. RSU. Barro-CE.

ABSTRACT

The inadequate disposal of MSW exposes the population and the environment to various harmful vectors, such as contamination of soil and groundwater due to leachate production. In Brazil, the use of controlled dumps and landfills for the final disposal of MSW has been banned since 2010, due to the enactment of Law No. 12305/2010. In Brazil, 79 million tons of solid waste were generated in 2018 alone. Of this total, 92% (72.7 million tons) was collected at the generation site and only 8% did not, representing a still alarming 6,3 million tons of MSW not collected. However, the biggest problem to be observed is the final destination of the collected solid waste, as only 59.5% (43.3 million tons) of these are disposed of in landfills, the other 40.5% (29.5 million) tons) dumped in inappropriate places such as dumps and controlled landfills. The objective of this work is to develop a sanitary landfill project for the municipality of Barro-CE following the guidelines of NBR 15849/2010. The rates of collection of solid urban waste are satisfactory, but the final destination is still made at the municipal dump, which causes several problems. The small landfill is a good solution to the problem of inadequate waste disposal in the municipality, due to its simplicity of construction and operation, the landfill is the best alternative for final disposal of solid waste, compared to dumps and controlled landfills, as it safely stores waste, thus minimizing the socio-environmental damage caused by it when disposed of incorrectly.

Key words: Small landfill. MSW. Barro-CE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação das regiões no total de RSU coletado.	13
Figura 2 – Geração total e per capita de resíduos no Brasil em 2017/2018.	18
Figura 3 – Variação de resistência do RSU em função dos processos de degradação.	19
Figura 4 – Evolução da degradação dos resíduos e composição dos gases em aterros sanitários.	21
Figura 5 – Composição Gravimétrica de RSU no Brasil em 2000 e 2012.	23
Figura 6 – Volume total coletado, por tipo de material no ano de 2017 e 2018.	24
Figura 7 – Diâmetro equivalentes dos componentes do RSU.	25
Figura 8 – Teor de umidade para RSU em função da profundidade.	26
Figura 9 – Umidade dos componentes do RSU.	26
Figura 10 – Peso específico x profundidade.	28
Figura 11 – Faixa de parâmetros de resistência do RSU recomendados para projeto.	30
Figura 12 – Curva tensão x deformação com a interação entre as duas parcelas de resistência, atrito e reforço.	31
Figura 13 – Curva teórica de compressibilidade do RSU.	32
Figura 14 – Esquema de um lixão a céu aberto.	33
Figura 15 – Esquema ideal de um aterro controlado.	34
Figura 16 – Esquema de um aterro sanitário	35
Figura 17 – Exemplo de aplicação de GCLs em barreira impermeabilizante de fundo de aterro sanitários.	38
Figura 18 – Elementos de drenagem superficial de aterro sanitário.	39
Figura 19 – Configurações para disposição de dreno horizontais.	40
Figura 20 – Esquema de disposição de drenos verticais.	42
Figura 21 – Esquema de dreno vertical e queimador de biogás.	43
Figura 22 – Possível esquema de cobertura final	45
Figura 23 – Mapa de localização do Município de Barro/CE.	48
Figura 24 – Índice de Desenvolvimento Humano Municipal e seus componentes.	48
Figura 25 – Longevidade, Mortalidade e Fecundidade - Município - Barro - CE	49
Figura 26 – Fluxograma de elaboração do projeto e aterro sanitário.	49
Figura 27 – Abastecimento de água em Barro/CE.	51
Figura 28 – Precipitação anual em Barro-CE.	52
Figura 29 – Amostras fora do padrão para turbidez.	52
Figura 30 – População atendida com serviço de esgotamento sanitário em Barro-CE.	54

Figura 31 – Área destinada ao aterro sanitário.	61
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Geração per capita de RSU em países desenvolvidos.	18
--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tempo médio de duração das fases da bioestabilidade nos aterros sanitários. .	21
Quadro 2 – Porcentagens típicas e características dos componentes dos RSU.	22
Quadro 3 – Composição percentual gravimétrica de RSU em várias regiões do globo.	23
Quadro 4 – Valores do peso específico de aterros de resíduos sólidos no Brasil.	27
Quadro 5 – Valores de coeficientes de permeabilidade de aterros de RSU no Brasil.	28
Quadro 6 – Coeficiente de permeabilidade de aterros de resíduos sólidos urbanos.	29
Quadro 7 – Critérios para dispensa do sistema de impermeabilização de fundo.	39
Quadro 8 – Valores de K em função do peso específico para aplicação no Método Suíço.	41
Quadro 9 – Instruções para a drenagem dos gases.	43
Quadro 10 – Indicadores de Água – Barro/CE.	50
Quadro 11 – Indicadores de Esgoto – Barro/CE.	53
Quadro 12 – Resumo de geração de RSU em Barro /CE.	55
Quadro 13 – Quadro de funcionários de limpeza urbana.	56
Quadro 14 – Divisão de rotas por bairros.	56
Quadro 15 – Detalhamento da ZGL1.	57
Quadro 16 – Detalhamento da ZGL2.	57
Quadro 17 – Detalhamento da ZGL3.	57
Quadro 18 – Detalhamento da ZGL4.	58
Quadro 19 – Detalhamento da ZGL5.	58
Quadro 20 – Detalhamento da ZGL6.	58
Quadro 21 – Detalhamento da ZGL7.	59
Quadro 22 – Detalhamento da frota de cada zona.	59
Quadro 23 – Detalhamento do comprimento da vala.	62
Quadro 24 – Cálculo do lixiviado de 2021 a 2035.	62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos.....	14
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i>	15
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	15
1.2 Estrutura do trabalho	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Resíduos Sólidos.....	16
2.2 Resíduos Sólidos Urbanos	17
2.2.1 <i>Características dos RSU</i>	17
2.2.2 <i>Métodos de Disposição do RSU</i>	33
2.2.2.1 <i>Lixão</i>	33
2.2.2.2 <i>Aterro Controlado</i>	33
2.2.2.3 <i>Aterro Sanitário</i>	34
2.3 Projeto de Aterro Sanitário	35
2.3.1 <i>Aterro Sanitário de Pequeno Porte</i>	35
2.3.2 <i>Critérios e Diretrizes para a Localização do Aterro Sanitário</i>	36
2.3.3 <i>Topografia</i>	36
2.3.4 <i>Caracterização Geológica e Geotécnica</i>	37
2.3.5 <i>Caracterização Climatológica</i>	37
2.3.6 <i>Sistemas de Proteção</i>	37
2.3.6.1 <i>Camada impermeabilizante</i>	38
2.3.6.2 <i>Sistema de drenagem de águas pluviais</i>	39
2.3.6.3 <i>Sistema de manejo de lixiviados</i>	39
2.3.6.4 <i>Drenagem e Tratamento dos gases</i>	42
2.3.6.5 <i>Camada de cobertura</i>	44
3. METODOLOGIA.....	47
3.1 Tipologia da Pesquisa.....	47
3.2 Caracterização da Área de Estudo.....	47
3.3 Planejamento da Pesquisa.....	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
4.1 Abastecimento de água e esgotamento sanitário município de Barro/CE	50
4.2 Diagnóstico dos resíduos sólidos no município de Barro/CE	54
4.3 Recursos financeiros destinados aos resíduos sólidos no município de Barro/CE .	60
4.4 Aterro sanitário simplificado para o município de Barro/CE.....	60

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65
REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

A geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) cresceu exponencialmente nas últimas décadas, não apenas em quantidade como também em diversidade, tendo como principais fatores o desenvolvimento econômico, o aumento populacional, a urbanização e a revolução tecnológica, além das mudanças no estilo de vida e nos modos de produção e consumo da população (GOUVEIA, 2012). Devido esse crescimento, graves problemas surgiram relacionados à geração e ao acúmulo de RSU, principalmente na área ambiental e da saúde populacional.

A disposição inadequada de RSU expõe a população e o ambiente a vários vetores nocivos, tais como a contaminação do solo e dos lençóis freáticos devido à produção de chorume, que é “ um líquido escuro de odor desagradável que possui uma carga elevada de sólidos orgânicos e de substâncias inorgânicas agregadas a água que percola através do aterro” (SANTOS, 2003, p.23), e a contaminação da atmosfera pela produção de biogás, que se caracteriza pela mistura de gases provenientes da decomposição da matéria orgânica, com predominância de gás metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), colaborando com o efeito estufa (SANTOS, 2003) e que em caso de produção em ambiente enclausurado, como no aterro controlado, pode ocorrer risco de combustão.

Outro vetor de grande impacto socioambiental é o aumento no número de animais transmissores de doenças, como ratos e baratas, principalmente ao redor dos locais de depósitos de resíduos, como nos lixões. Nesses locais, os resíduos ficam expostos ao meio sem nenhum tipo de cobertura, atraindo assim não só animais como também pessoas em situação de vulnerabilidade social e econômica que buscam ali por materiais que possam ser reutilizados, como alumínio, plástico e vidros, e/ou outros objetos que possam conter algum valor. Essas pessoas, na maior parte dos casos, além de estarem coletando resíduos em locais inadequados, estão expostas ao risco de serem contaminadas com diversos tipos de doenças graves.

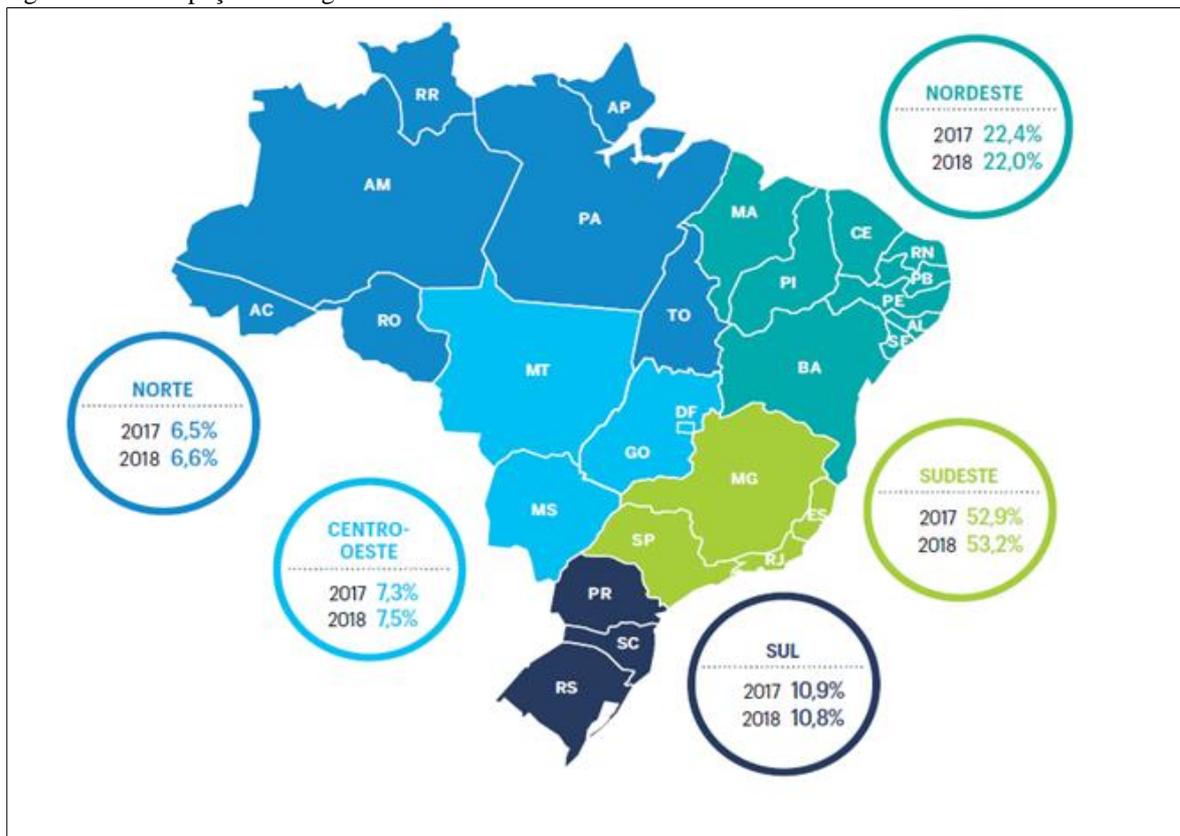
É válido ressaltar que no Brasil foi proibido a utilização de lixões e aterros controlados para disposição final de RSU desde 2010, devido a promulgação da lei de N° 12305/2010 que:

Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis. (BRASIL, 2010, Art. 1º)

É importante salientar a diferença entre resíduos e rejeitos, já que rejeitos são um tipo específico de resíduo, caracterizado pelo esgotamento das possibilidades de reaproveitamento ou reciclagem do material, possuindo como única opção de destinação final a disposição em aterro sanitário.

Segundo Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2018), no Brasil, foram gerados 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos apenas no ano de 2018. Desse total, 92% (72,7 milhões de toneladas) foi coletada no local de geração e apenas 8% não, representando o total ainda alarmante de 6,3 milhões de toneladas de RSU não coletados. Contudo, o maior problema a ser observado é a destinação final dos resíduos sólidos coletados, pois apenas 59,5% (43,3 milhões de toneladas) desses tem destinação em aterros sanitários, sendo os outros 40,5% (29,5 milhões de toneladas) despejados em locais impróprios como lixões e aterros controlados. As regiões do Brasil apresentam diferentes percentuais de participação na geração de RSU, como demonstrado na Figura 1.

Figura 1 – Participação das regiões no total de RSU coletado.



Fonte: ABRELPE (2018)

Ainda segundo (ABRELPE, 2018), dentre as 5 regiões que compõem o Brasil, o Nordeste foi a região com o menor índice de coleta de RSU. Composta por 9 estados somando 1.794 municípios, o Nordeste gerou um total de 53.975 toneladas/dia (durante o ano de 2018),

teve coletado aproximadamente 80%, contudo apenas 35% desse total sendo disposto em locais adequados, como em aterros sanitários. Os outros 65% são destinados a lixões e aterros controlados, causando diversos problemas socioambientais já aqui descritos. O número destes locais corresponde a 3 vezes o número de aterro sanitários, totalizando 1340 unidades em toda a região.

Dentre os 9 estados da região Nordeste, o Ceará é composto por um total de 184 municípios, que de acordo com (CEARÁ, 2012) 92 deles têm população de até 20.000 habitantes e 69 têm população rural maior que a população urbana, considerando seus aspectos sociais, ambientais e financeiros, a gestão de resíduos sólidos se torna um grave problema para o poder públicos, sendo necessárias soluções diferenciadas para essa problemática, tendo em vista a diversidade demográfica do estado.

O Ceará apresenta deficiências nos serviços de coleta, tratamento e disposição final de RSU, de acordo com Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010) somente 85% de RSU gerados nos estados são coletados no local de geração, destes 41,8% são destinados para aterros sanitários, enquanto 58,2% são dispostos em lixões, além disso o estado sofre com a precariedade na gestão e na infraestrutura necessária para a operação desses serviços.

O aterro sanitário é a forma adequada e segura de se depositar o lixo produzido pela população e é uma das técnicas mais seguras e de baixo custo existentes. Sua instalação diminui a proliferação de animais causadores de algumas doenças que colocam em risco a saúde da população. Além de prevenir a contaminação do solo e das águas, também contribui para a redução das queimadas descontroladas, que acabam sendo responsáveis por mais poluição no ar e aumento do efeito estufa.

Diante dos aspectos apresentados sobre a problemática da destinação final inadequada de RSU e o panorama geral sobre a geração, coleta e destinação final de RSU, tendo em vista a necessidade socioambiental e adequação a legislação que tratam do assunto, o município de Barro, localizado ao sul do estado do Ceará, a 440km da capital Fortaleza, foi escolhido como local deste estudo.

Ademais, esse estudo mostrará a importância de um bom gerenciamento dos resíduos sólidos que trará benefícios ao município, evitando os problemas gerados pela d. Outro fato de relevância desse estudo está no benefício para estudantes ou pesquisadores futuros que necessitem de informações técnicas e aplicadas sobre o assunto.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um projeto de aterro sanitário de pequeno porte para o município de Barro – CE seguindo as orientações da NBR 15849/2010.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Diagnosticar a disposição de resíduos sólidos no município de Barro – CE;
- Analisar a situação financeira do município para avaliar a aplicação de recursos na construção de um aterro sanitário para o município;
- Propor um projeto simplificado de aterro sanitário de pequeno porte como solução técnica para o município de Barro – CE.

1.2 Estrutura do trabalho

Na seção 01, a introdução, é apresentado o tema de estudo do projeto em uma abordagem geral dos tópicos a serem estudados.

Na seção 02 será apresentado o referencial teórico utilizado como embasamento para o desenvolvimento das ideias e do projeto.

O procedimento metodológico, com ênfase nas bases teóricas aplicadas para o desenvolvimento do trabalho, assim como possíveis materiais e métodos utilizados durante a pesquisa serão apresentados na Seção 03 deste trabalho.

A seguir, Seção 04 e Seção 05, serão apresentados os resultados e conclusões esperados ao fim do desenvolvimento do trabalho, como também sugestões para pesquisas e trabalhos futuros. Ao fim, são mostradas as referências.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) qualificou e aprofundou as discussões a respeito da disposição dos resíduos, discussão recorrente nas esferas nacional e internacional, devido à expansão da consciência coletiva com relação ao meio ambiente. A PNRS propõe uma articulação institucional envolvendo os três entes federados (União, Estados e Municípios), o setor produtivo e a sociedade em geral. Busca-se soluções para os problemas na gestão resíduos sólidos que comprometem a qualidade de vida dos brasileiros, pois a complexidade das atuais demandas ambientais, sociais e econômicas induz a um novo posicionamento dos três níveis de governo, da sociedade civil e da iniciativa privada (MMA, 2020).

2.1 Resíduos Sólidos

Os resíduos sólidos são definidos pela NBR 10.004 como:

Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. (ABNT, 2014, p.1)

Ainda de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2014) os resíduos sólidos podem ser classificados de acordo com sua atividade que lhe deu origem e de seus componentes, por suas características e pela comparação dos constituintes com listagens de resíduos e substâncias das quais os impactos à saúde e ao meio ambiente já são conhecidos, sendo classificados como Classe I – Perigosos e Classe II – Não perigosos, que se subdividem em Classe II A – Não inertes e Classe II B – Inertes.

Os Resíduos Classe I – Perigosos são resíduos que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, podem apresentar risco à saúde pública ou ao meio ambiente, devido a sua toxicidade, reatividade, inflamabilidade, corrosividade e patogenicidade.

Os Resíduos Classe II A – Não inertes são resíduos que possam ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água, mas não se enquadram na classificação de resíduos classe I e classe II B.

Os Resíduos Classe II B – Inertes são quaisquer resíduos que, submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada à temperatura ambiente, tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

2.2 Resíduos Sólidos Urbanos

Segundo o Art. 13 da Lei nº 12305, de 2 de agosto 2010 (BRASIL, 2010) resíduos sólidos urbanos (RSU) são resíduos originários de atividades domésticas em residências urbanas em somatório com os resíduos originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana.

2.2.1 Características dos RSU

Os resíduos sólidos urbanos são constituídos de diversos tipos de componentes tais como, metais, plásticos, papéis, vidros, madeiras, têxteis, resíduos orgânicos, pedras e solos, formando, assim, um maciço heterogêneo e poroso de comportamento próprio. Apresentam propriedades biológicas, físicas e mecânicas.

2.2.1.1 Geração de RSU Per Capita

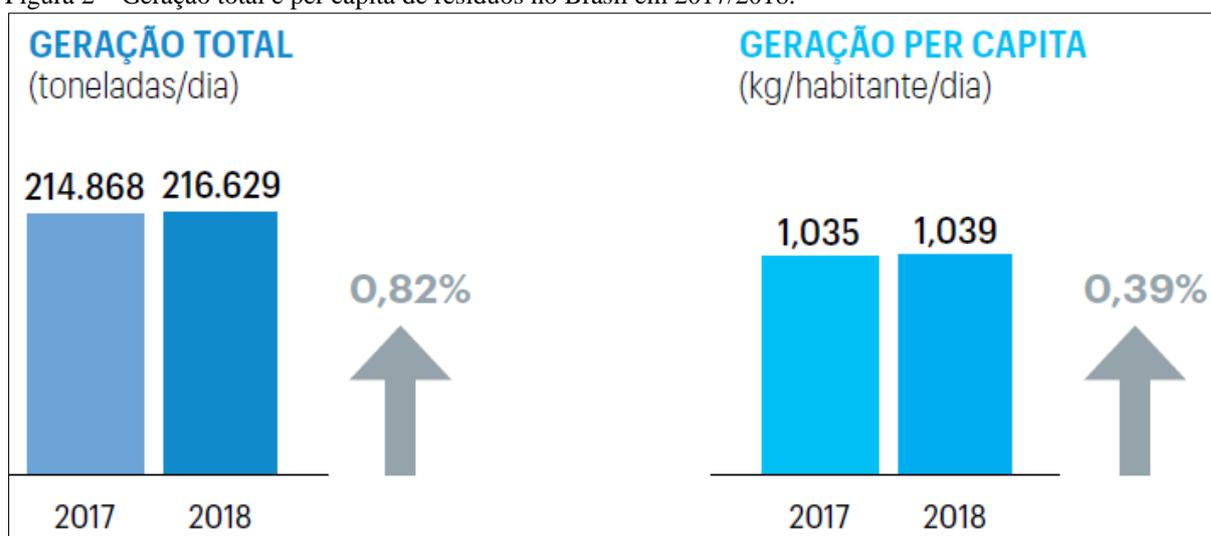
A geração per capita relaciona a quantidade de resíduos gerados durante 1 dia por número de habitantes de uma determinada região, porém, apesar de relação direta com o número de habitantes de uma região, locais com grandes populações não necessariamente apresentam grande geração per capita. Nota-se uma tendência em que locais com maior desenvolvimento econômico e tecnológico apresentam maior geração per capita de resíduos urbanos, como pode ser visto entre a comparação de países desenvolvidos (Tabela 1) e o Brasil (Figura 2)

Tabela 1 – Geração per capita de RSU em países desenvolvidos.

Geração de RSU nos EUA e países da União Europeia		
País	Geração de RSU (1000 ton/dia)	Geração per capita (kg/hab/dia)
Áustria	14,9	1,773
Bélgica	16,4	1,493
Dinamarca	800,9	2,306
Estados Unidos	8,7	2,007
Finlândia	110,1	1,621
França	156,4	1,693
Alemanha	18	1,913
Grécia	9,1	1,589
Irlanda	104,2	1,999
Itália	1,1	1,718
Luxemburgo	31,9	2,229
Holanda	7,7	1,914
Noruega	16,5	1,558
Portugal	78,5	1,558
Espanha	13,9	1,701
Suécia	13,9	1,481
Reino Unido	104,2	1,666
União Europeia	811,2	1,615

Fonte: Santos *et. al.* (2018).

Figura 2 – Geração total e per capita de resíduos no Brasil em 2017/2018.



Fonte: ABRELPE (2018).

2.2.1.1 Propriedades biológicas

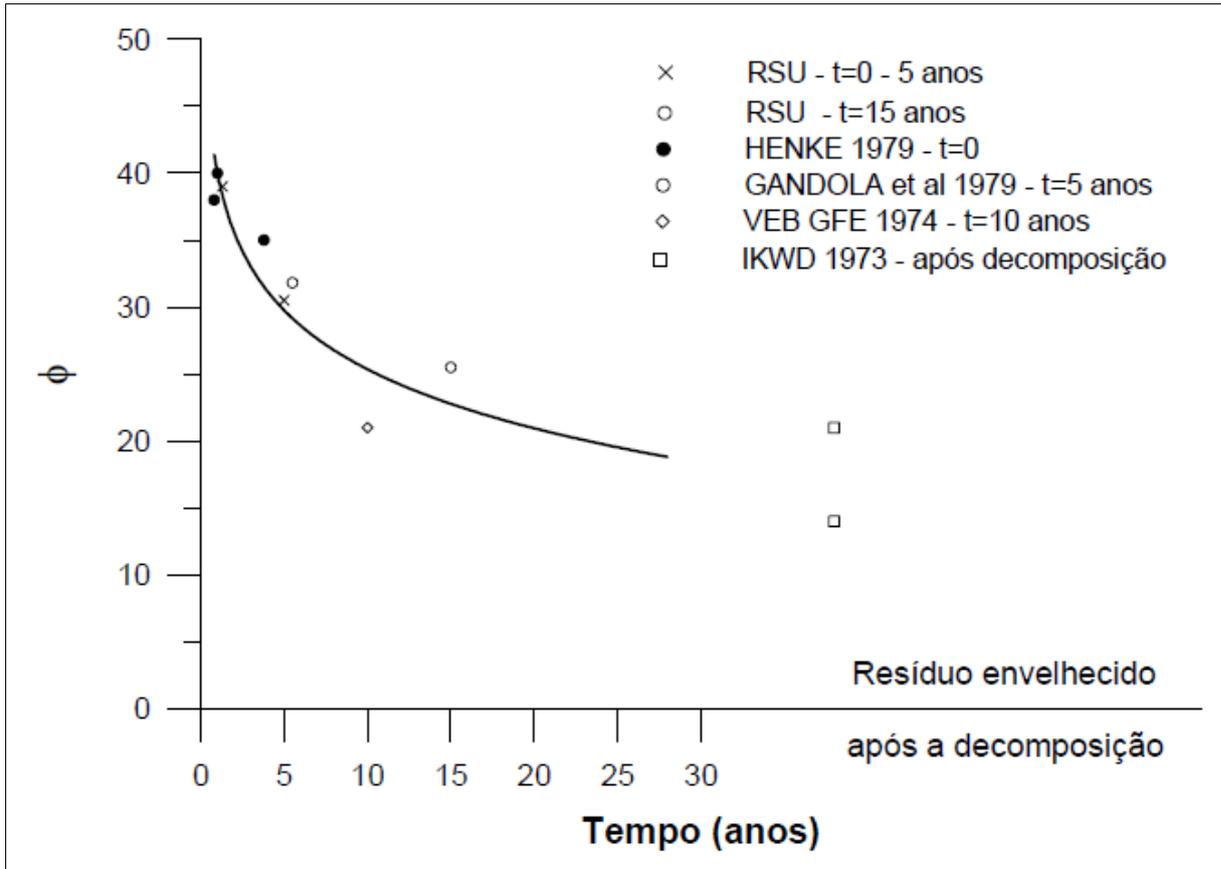
Segundo Carvalho (1999), muitos componentes sólidos sofrem transformações biológicas, sendo transformados em biogás e em líquidos, alterando assim o volume dos materiais depositados como as propriedades geotécnicas do maciço ao longo do tempo.

2.2.1.1.1 Biodegradação

Consiste na transformação de componentes orgânicos complexos em biogás, líquidos (chorume), matéria orgânica mineralizada e em compostos orgânicos mais simples. Essa degradação é feita através de processos de decomposição da matéria orgânica, através de processos aeróbios, que ocorrem na presença de oxigênio e tem curta duração (em média algumas semanas) e de processos anaeróbios, que ocorrem logo após o consumo total de oxigênio, sendo o de maior predominância e duração (CARVALHO, 1999).

Uma série de fatores influenciam os processos de biodegradação, podendo-se citar teor de umidade, composição dos resíduos, temperatura (no corpo do aterro e ambiente externo), tamanho de partículas e grau de compactação do RSU, além de medidas de operação do aterro (compactação, existência de cobertura diária, drenagem). O teor de umidade é o fator de maior impacto, pois promove um ambiente aquoso, que facilita o transporte de nutrientes e de microrganismos (CARVALHO, 1999)

Ainda segundo Carvalho (1999), o maciço do aterro poderá sofrer alterações nas suas capacidades geotécnicas, como o aumento da densidade e a conseqüente diminuição da permeabilidade e da compressibilidade do aterro devido a variação de massa causada pela degradação dos resíduos, ao longo de sua vida útil. Além disso, ocorre a diminuição da resistência ao cisalhamento através do enfraquecimento do efeito reforço dado pela presença de materiais plásticos, têxteis e fibras. Outro fator onde ocorre redução ao longo do tempo é o ângulo de atrito, para vários resíduos com diferentes idades, como demonstrado na Figura 3.



Fonte. CARVALHO (1999).

2.2.1.1.2 Fases de estabilização de um aterro sanitário.

De acordo com Bidone & Povinelli (1999 *apud* CARVALHO, 1999, p. 30) a bioestabilidade nos aterros sanitários, devido a transformação anaeróbia do material orgânico bruto com a geração de gás metano (metagênese), ocorre em 5 fases distintas.

A Fase I, de ajustamento inicial consiste na disposição dos resíduos, acúmulo de umidade, subsidência inicial e cobertura da área. É o início do processo de estabilização detectado por mudanças nos parâmetros ambientais.

A Fase II, de transição, consiste na formação de chorume, ou seja, é a transição da fase aeróbia para a anaeróbia. Há o estabelecimento das condições de óxido-redução e aparecimento de compostos intermediários (ácidos voláteis).

A Fase III, de formação de ácidos, consiste na predominância de ácidos voláteis de cadeia longa. Há o decréscimo de pH com consequentes mobilização e possível complexação de espécie metálicas, além da liberação de nutrientes com N e P que serão utilizados como suporte para o crescimento da biomassa. O hidrogênio é detectado a sua presença afeta a natureza e o tipo de produtos intermediários em formação

A Fase IV, de fermentação metânica consiste nos produtos intermediários que aparecem durante a fase de formação de ácidos são convertidos em CH_4 e CO_2 . Há o retorno do pH à condição de tampão, controlado pelos ácidos voláteis, potenciais redox nos valores mais baixos, precipitação e complexação dos metais e drástica redução de demanda biológica de oxigênio (DBO) (medida no lixiviado) com correspondente aumento na produção de gás.

A Fase V, de maturação final, consiste na estabilização da atividade biológica, com relativa inatividade. Há a escassez de nutrientes e paralisação de produção de gás, predominância de condições ambientais naturais, aumento do valor do potencial redox com o aparecimento de O_2 e espécies oxidadas e conversão lenta dos materiais orgânicos resistentes aos microrganismos em substâncias húmicas complexadas com metais.

Cada fase tem seu respectivo tempo de duração, podendo variar de acordo com diversos fatores como pH, Eh, alcalinidade, nutrientes, infiltração da água no aterro, temperatura, composição e grau de compactação do resíduo, disposição e cobertura final. O tempo de duração média para cada fase está disposto no Quadro 1.

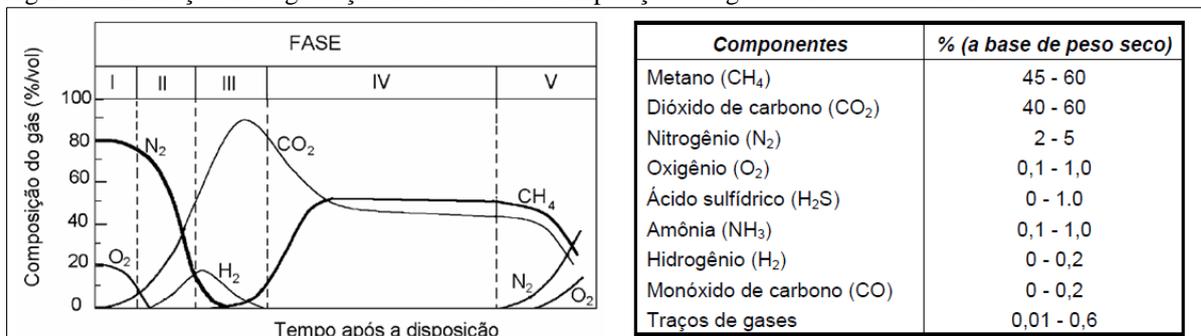
Quadro 1 – Tempo médio de duração das fases da bioestabilidade nos aterros sanitários.

Duração das fases da bioestabilidade nos aterros sanitários	
Fase	Duração Média
Fase I	Aproximadamente 1 semana
Fase II	De 1 a 6 semanas
Fase III	De 3 meses a 3 anos
Fase IV	De 8 a 40 anos.
Fase V	De 1 a 80 anos.

Fonte: Adaptado de CARVALHO (1999).

Com a decomposição dos resíduos, outros gases além do CH_4 e CO_2 são produzidos nas diferentes fases de estabilização e em diferentes quantidades, como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Evolução da degradação dos resíduos e composição dos gases em aterros sanitários.



Fonte: CARVALHO (1999).

2.2.1.2 Propriedades físicas

As propriedades físicas dos RSU que mais se destacam incluem teor de umidade, peso específico, composição (Gravimetria), tamanho de partículas e permeabilidade.

2.2.1.2.1 Composição

A composição física ou gravimétrica define o percentual dos diversos componentes presentes no lixo. Segundo Carvalho (1999), a fase sólida dos RSU pode ser dividida em 3 categorias de materiais: inertes estáveis (vidros, metais, cerâmicas, solos, cinzas e resto de demolição), altamente deformáveis (plásticos, papéis, têxteis e borracha) e orgânicos biodegradáveis (resíduos de poda e alimentares acompanhados pela produção de líquidos e gases). O Quadro 2 mostra as principais características dos RSU e seu percentual típico em peso.

Quadro 2 – Porcentagens típicas e características dos componentes dos RSU.

Porcentagens típicas e principais características dos componentes dos RSU		
Material	Porcentagem (em peso)	Características
Resíduos Orgânicos	10 - 20	úmido, fermenta e degrada rapidamente, compressível, fraco
Papel e pano	10 - 40	seco a úmido, degrada e queima, compressível
Resíduos de poda	10 - 20	úmido, fermenta, degrada e queima
Plásticos	1 - 2	seco, compressível, resistente a degradação, mas pode queimar
Instrumentos de Metal	5 - 15	seco, corrosível e triturável
Metal maciço	1	seco, levemente corrosível e rígido
Borracha	5 - 10	seco, elástico, queimável, compressível, resistente a degradação
Vidro	5 - 15	seco, triturável e compressível, resistente a degradação
Madeira de demolição	0 - 5	seco, triturável, compressível, degrada e queima
Entulho	0 - 10	úmido, triturável, erodível, resistente a degradações
Cinzas e escória	0 - 5	úmido, compressível, quimicamente ativo e parcialmente solúvel

Fonte: CARVALHO (1999).

A composição gravimétrica é reflexo do nível de renda da população, de modo que se espera que em regiões onde a população possua um maior poder de compra, apresentem menor percentual de matéria orgânica nos seus resíduos gerados, decorrente da maior utilização de alimentos semiprontos e menor manipulação de alimentos. Em contrapartida, os percentuais de vidro e materiais plásticos tendem a ser mais elevados,

devido ao maior consumo de artigos supérfluos, bebidas finas e produtos *delicatessen* (NETO, 2004).

Seguindo a mesma tendência da geração per capita de resíduos, a composição gravimétrica também é influenciada por fatores econômicos, tecnológicos e por perfis de consumo de uma população, como pode ser visto no Quadro 3.

Quadro 3 – Composição percentual gravimétrica de RSU em várias regiões do globo.

Composição gravimétrica de várias regiões do globo.									
Região	Resíduos Orgânicos	Papel/Papelão	Madeira	Têxteis	Borracha/Couro	Plástico	Metal	Vidro	Outros
Ásia									
Oriental	26,2	18,8	3,5	3,5	1,0	14,3	27,0	3,1	7,4
Centro Sul	40,3	11,3	7,9	2,5	0,8	6,4	3,8	3,5	21,9
Sudeste	43,5	12,9	9,9	2,7	0,9	7,2	3,3	4,0	16,3
Ocidental e Oriente Médio	41,1	18,0	9,8	2,9	0,6	6,3	1,3	2,2	5,4
África									
Oriental	53,9	7,7	7,0	1,7	1,1	5,5	1,8	2,3	11,6
Central	43,4	16,8	6,5	2,5	-	4,5	3,5	2,0	1,5
Nordeste	51,1	16,5	2,0	2,5	-	4,5	3,5	2,0	1,5
Sudeste	23,0	25,0	15,0	-	-	-	-	-	-
Ocidental	40,4	9,8	4,4	1,0	-	3,0	1,0	-	-
Europa									
Oriental	30,1	21,8	7,5	4,7	1,4	6,2	3,6	10,0	14,6
Nordeste	23,8	30,6	10,0	2,0	-	13,0	7,0	8,0	-
Sudeste	36,9	17,0	10,6	-	-	-	-	-	-
Ocidental	24,2	27,5	11,0	-	-	-	-	-	-
Oceania									
Austrália e Nova Zelândia	36,0	30,0	24,0	-	-	-	-	-	-
Restante da Oceania	67,5	6,0	2,5	-	-	-	-	-	-
América									
Norte	33,9	23,2	6,2	3,9	1,4	8,5	4,6	6,5	9,8
Central	43,8	13,7	13,5	2,6	1,8	6,7	2,6	3,7	12,3
Sul	44,9	17,1	4,7	2,6	0,7	10,8	2,9	3,3	13,0
Caribe	46,9	17,0	2,4	5,1	1,9	9,9	5,0	5,7	3,5

Fonte: Adaptado de IPCC (2006) *apud* Günther (2016).

A Figura 5 mostra o comparativo entre a composição gravimétrica dos RSU no Brasil nos anos 2000 e 2012.

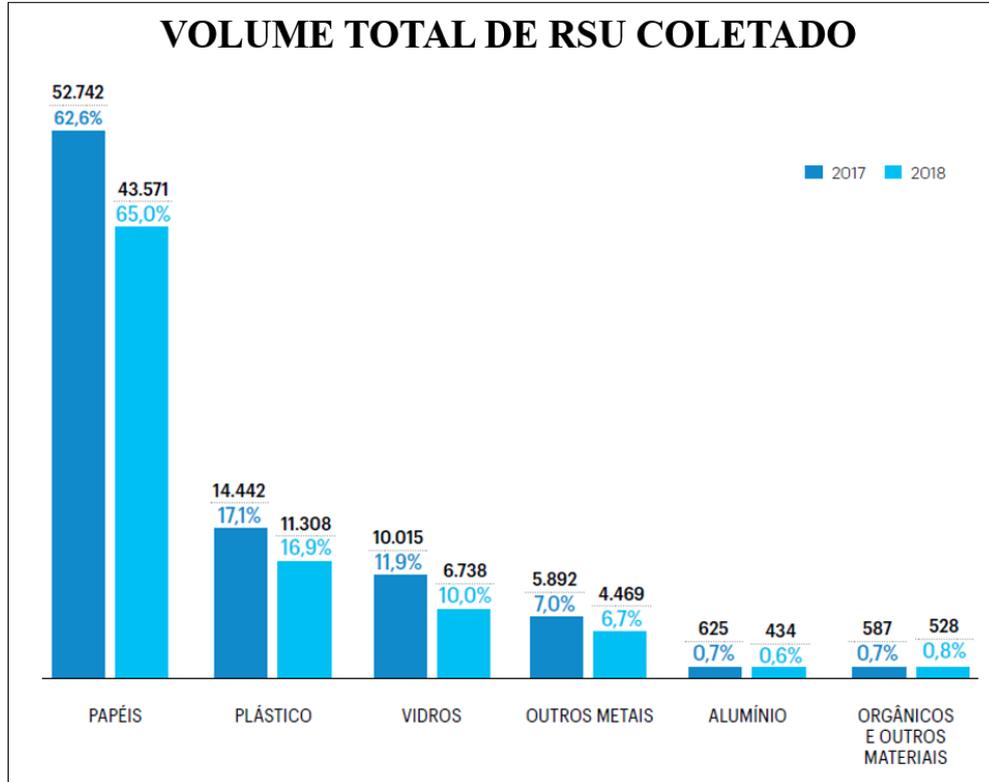
Figura 5 – Composição Gravimétrica de RSU no Brasil em 2000 e 2012.



Fonte: IPT (2000) & ABRELPE (2013a) *apud* Günther (2016).

A Figura 6 mostra a análise de volume coletado de RSU por tipo de material, feita pela Associação Nacional dos Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis (ANCAP) no ano de 2017 e 2018.

Figura 6 – Volume total coletado, por tipo de material no ano de 2017 e 2018.

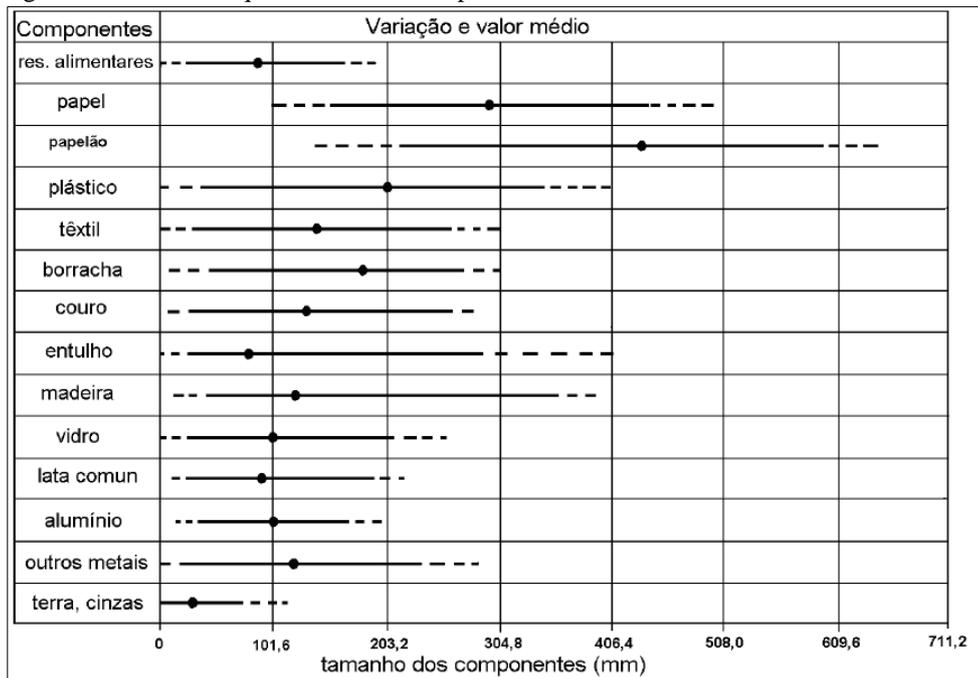


Fonte: ABRELPE (2018).

2.2.1.2.2 Distribuição do Tamanho das Partículas

Diante da grande heterogeneidade e variedade dos RSU, as opções de procedimentos para determinação da distribuição das dimensões de seus componentes são limitadas. Para uma aproximação inicial, tem-se procurado correlacionar os componentes individuais do resíduo a diâmetros equivalentes (TCHONOBANOGLIOUS *et al* 1993 *apud* NASCIMENTO, 2007), como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Diâmetro equivalentes dos componentes do RSU.



Fonte: Nascimento (2004).

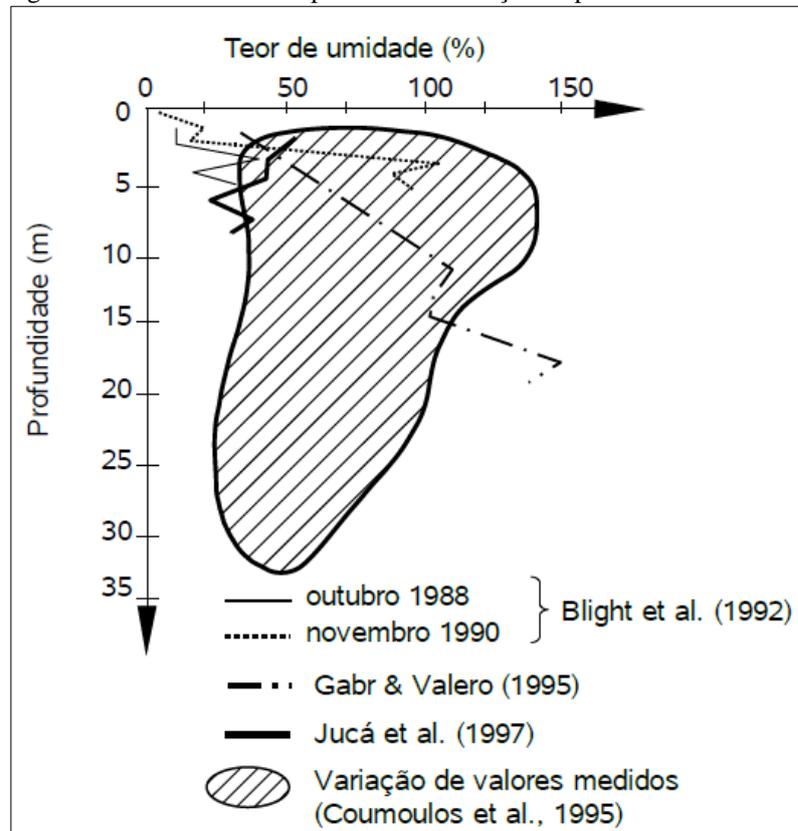
Outro procedimento que pode ser usado é a análise clássica de peneiramento e traçar a curva de distribuição do tamanho dos grãos. Segundo Knochenmus et al (1998 apud Nascimento, 2007, p. 47) a variação dos componentes pode ser de dimensões inferiores a 0,075mm a dimensões de pedregulhos. Contudo, devido a biodegradação da matéria orgânica, existe uma tendência no aumento da porcentagem da fração mais fina do RSU com tempo.

2.2.1.2.3 Teor de Umidade

De acordo com Neto (2007) o teor de umidade do RSU depende de uma série de fatores como composição granulométrica inicial, as condições climáticas, o grau de compactação biológica e o próprio sistema de drenagem interno do aterro. Podendo ser representando, da mesma forma que na mecânica dos solos, com uma relação entre a massa de água e a massa seca ou tal como na agronomia, considerando-se a massa úmida.

O teor de umidade pode ser obtido através da secagem de amostras representativas em estufa ou através de sonda de nêutrons. O mesmo aterro sanitário pode apresentar diversas regiões com significativa mudanças no teor de umidade entre um ponto e outro, tornando-se importante a obtenção do perfil de umidade com a profundidade, como ilustrado na Figura 8 (NASCIMENTO, 2004).

Figura 8 – Teor de umidade para RSU em função da profundidade.



Fonte: Carvalho (1999).

Ainda segundo Nascimento (2004) os componentes dos RSU apresentam grande variações de valores de umidade, sendo a matéria orgânica responsável pelos maiores valores encontrados. Em seu estudo no aterro Bandeirantes, São Paulo, Carvalho (1999) apresenta os valores de umidade para diferentes componentes do resíduo, como demonstrado na Figura 9.

Figura 9 – Umidade dos componentes do RSU.

COMPONENTES	UMIDADE (%)	
	Base seca	Base úmida
Metais	19,6	16,4
Papel	74,8	42,8
Vidro	5,9	5,57
Plástico	41,5	29,3
Borracha	24,5	19,6
Têxteis	55,0	35,5
Pedra	12,6	11,2
Madeira	69,8	41,1
Pasta Orgânica	47,0	32,0

Fonte: CARVALHO (1999).

2.2.1.2.4 Peso Específico

O Peso específico representa a relação entre o peso e o volume unitário na massa de resíduos. De acordo com Neto (2004) o peso específico dos RSU sofre uma grande variação em cada etapa considerada, desde a geração até a disposição final. Logo, deve ser calculado conforme o objetivo do qual se faz necessário ou deve ser feito em cada uma das etapas.

Segundo Carvalho (1999) os principais fatores que influenciam o peso específico do RSU aterrado são composição (gravimetria) e teor de umidade do RSU, camadas diárias de cobertura, compactação, decomposição e consolidação do resíduo com o tempo, conforme visualizado no Quadro 4. Em aterros mais antigos o peso específico tende a aumentar com a profundidade devido a bioconsolidação do RSU com o tempo e à compressão devido à sobrecarga das camadas superiores, ilustrado na Figura 10.

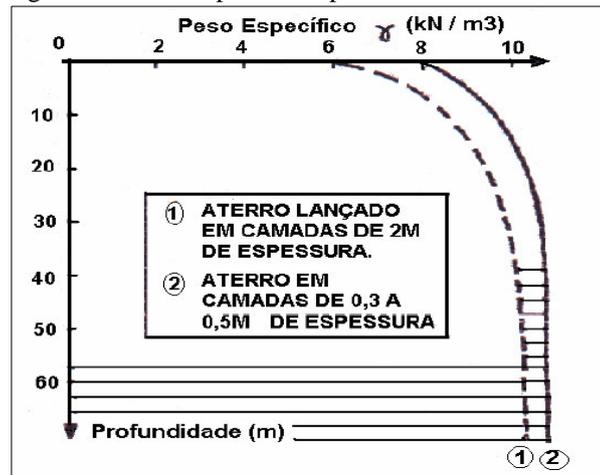
De acordo com Nascimento (2007) devido as características heterogêneas e peculiares dos RSU, as técnicas usadas para determinar o peso específico *in situ* apresentam grande imprecisão nos resultados, podendo haver variações significativas nos resultados obtidos. Entre essas técnicas utilizadas, destacam-se os ensaios em poços escavados (2m a 4m de profundidade) ou trincheira e aqueles empregando radiação gama.

Quadro 4 – Valores do peso específico de aterros de resíduos sólidos no Brasil.

Autor	Peso Específico γ (kN/m³)	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	7,00	Resíduos recém lançados
	10,00	Resíduos após a ocorrência de recalques
Mahler &Iturri, 1998	10,50	Seção do aterro sanitário do Sítio São João com 84m de desnível e 10 meses de alteamento
Benvenuto& Cunha, 1991	10,00	Condição drenada
	13,00	Condição saturada

Fonte: NETO (2004).

Figura 10 – Peso específico x profundidade.



Fonte: NETO (2004).

2.2.1.2.5 Permeabilidade

A permeabilidade é um parâmetro importante para um projeto e operação de aterro sanitário, principalmente no dimensionamento do sistema de drenagem interna de efluentes líquidos e gasosos.

Normalmente o coeficiente de permeabilidade é obtido através de ensaios laboratoriais e ensaios *in situ*, executados em trincheiras e poços escavados de grande diâmetro ou em furos de sondagem. De acordo com Nascimento (2004) a determinação do coeficiente de permeabilidade através dos ensaios em campo, apresentam inúmeras dificuldades devido ao caráter heterogêneo dos RSU.

Segundo Carvalho (1999) a permeabilidade deve ser determinada caso a caso devido a dependência de outros fatores, tais quais processo de aterramento, grau de compactação, pressão de sobrecarga, idade e composição do RSU.

Nas obras de Carvalho (1999) e Neto (2004), ambos apresentam valores de permeabilidade encontrados por diversos autores internacionais e nacionais, sendo ilustrados no Quadro 5 e no Quadro 6.

Quadro 5 – Valores de coeficientes de permeabilidade de aterros de RSU no Brasil.

Referência	Peso Específico γ	Coefficiente de Permeabilidade	Método de Ensaio
	(kN/m^3)	k (m/s)	
Ehrlich et al. (1994)	8	10^{-5}	Ensaio <i>in situ</i> em furo de sondagem
Mariano & Jucá (1998)	-	$1,89 \times 10^{-8}$ a $4,15 \times 10^{-6}$	Ensaio <i>in situ</i> em furo de sondagem
Santos et al (1998)	14 a 19	1×10^{-7}	Ensaio <i>in situ</i> em furo de sondagem
Carvalho (1999)	8 a 15	5×10^{-8} a 8×10^{-6}	-
Aguiar (2001)	-	$9,39 \times 10^{-7}$ a $1,09 \times 10^{-6}$	Permeâmetro Guelph

Fonte: NETO (2004).

Quadro 6 – Coeficiente de permeabilidade de aterros de resíduos sólidos urbanos.

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

Fonte: CARVALHO (1999).

2.2.1.3 Propriedades Mecânicas

Os fatores de maior influência nas principais propriedades mecânicas do RSU (resistência ao cisalhamento e compressibilidade), são formados por sua composição, estado de alteração de resíduos e comportamento mecânico de cada componente (KNOCHENMUS *et al.* 1998 apud CARVALHO, 1999, p. 50).

Segundo Carvalho (1999) devido a sua composição heterogênea, com diferentes tipos de componentes, de dimensões e formas variadas, a obtenção de amostras de boa qualidade, a definição dos seus tamanhos e de ensaios adequados, se torna uma tarefa com elevada dificuldade para a quantificação das propriedades mecânicas dos resíduos sólidos urbanos.

2.2.1.3.1 Resistência ao cisalhamento

De acordo com Silva (2017) qualquer ponto no interior do maciço está sujeito a aos esforços devido ao peso próprio e aqueles gerados por forças externas. Resultando assim em um estado de tensão, de forma que se tem tensão normal (σ) e cisalhante (τ), que variam de acordo com o plano considerado. A resistência ao cisalhamento é a tensão cisalhante no plano de ruptura no momento da ruptura, que é gerado quando as forças cisalhantes se igualam as forças resistentes e uma superfície de cisalhamento crítica se desenvolve.

Segundo Borgatto (2010) da mesma forma que para os solos, a resistência ao cisalhamento do RSU, é um parâmetro geotécnico de interesse fundamental na descrição de suas propriedades geotécnicas, sendo assim, um elemento de fundamental importância para o projeto e operação de aterros sanitários, em especial para o cálculo de estabilidade do talude.

Ainda segundo Borgatto (2010) a obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento normalmente é feita através de ensaio laboratoriais, tais como, cisalhamento direto, célula triaxial e caixa de tração, feitos em equipamentos de médio e grande porte. Sendo a coleta e a obtenção de amostras representativas a maior dificuldade encontrada para realização desses ensaios.

De modo geral as análises de resistência ao cisalhamento de RSU são realizadas a partir de modelos e métodos estabelecidos para solos. Logo, sua resistência ao cisalhamento é geralmente realizada através do critério de rompimento de Mohr-Coulomb que envolve os parâmetros de ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c) (REMÉDIO, 2014). A Figura 11 mostra a faixa de valores recomendados para projeto de coesão e ângulo de atrito.

Figura 11 – Faixa de parâmetros de resistência do RSU recomendados para projeto.



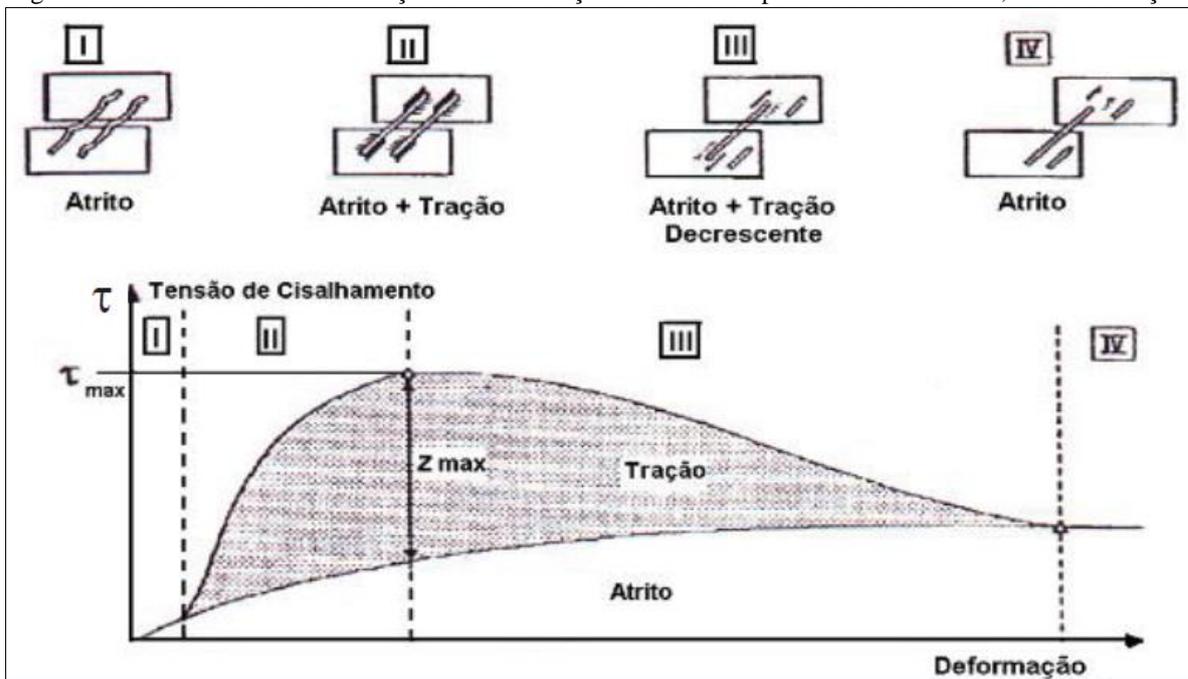
Fonte: CARVALHO (1999).

Porém, segundo Kolsch (1993, *apud* BORGATTO, 2006, p.39) o comportamento de aterros de solo com reforço geossintéticos se assemelha ao

comportamento de aterro sanitários, de modo que a resistência ao cisalhamento é função das forças de atrito atuantes no plano de cisalhamento e das forças de tração nas fibras.

Diante disso, de acordo com Ziehmamn (1999, apud BORGATTO, 2010, p.58) a resistência ao cisalhamento pode ser dividida em duas parcelas distintas de resistência: a 1ª resultado entre as partículas expresso matematicamente pelo ângulo de atrito e coesão, que segundo; a 2ª corresponde ao reforço pela resistência a tração das fibras, sendo expresso pelo ângulo de tensão a tração. Na Figura 12 apresenta a interação entre parcelas de forças, segundo o modelo por Kolsch (1993).

Figura 12 – Curva tensão x deformação com a interação entre as duas parcelas de resistência, atrito e reforço.



Fonte: BORGATTO (2010).

De acordo com a curva de tensão x deformação, para pequenas deformações (Fase I) existe apenas a mobilização das forças de atrito. Com o aumento das deformações, as fibras começam gradualmente a serem tracionadas (Fase II) ocorrendo assim, o aumento das forças de tração até o valor máximo de resistência a tração, onde a máxima resistência ao cisalhamento é alcançada. A partir deste ponto (Z_{max}) ocorre uma redução gradativa da parcela de forças de tração (Fase III), limitando a resistência ao cisalhamento a parcela devido ao atrito (Fase IV).

Segundo Motta (2010) a maioria das rupturas de aterros de resíduos sólidos urbanos ocorre devido as ações de fenômenos de cisalhamento associados a ruptura por tração.

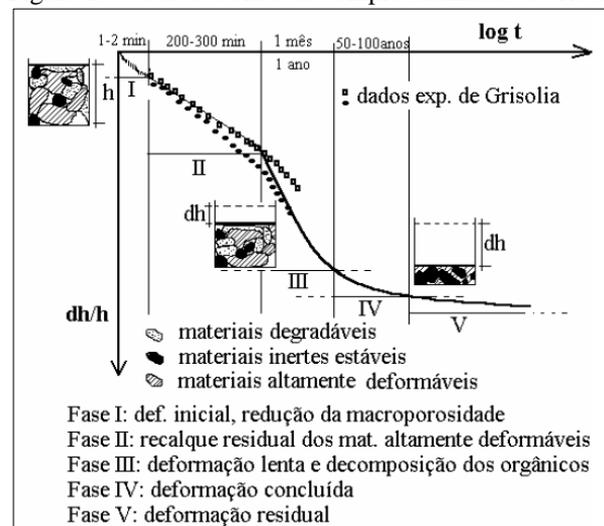
2.2.1.3.2 Compressibilidade

Segundo Silva (2017), a compressibilidade é a capacidade que um corpo ou substância tem de reduzir o seu volume quando se encontra submetido a pressões. No caso de aterros sanitários, a compressibilidade está relacionada ao carregamento imposto pelas camadas superiores, índice de vazios e transformações bioquímicas de seus materiais constituintes.

Manassero *et al* (1996 *apud* CARVALHO, 1999) apresentam mecanismos de recalque em aterro sanitários, que podem ser representados pelas seguintes fases: compressão mecânica resultante de rearranjo e a quebra de elementos sólidos devido ao peso próprio de RSU e peso dos materiais de cobertura; variação de volume casada pela migração de pequenas partículas para os vazios maiores (erosão e ravinamento internos); comportamento viscoso e fenômeno de consolidação envolvendo o esqueleto sólido e as partículas individuais, ou seja, os componentes; recalques causados pela biodegradação do material orgânico; colapso dos componentes devido as alterações físico-químicas processadas através da corrosão, oxidação e degradação dos componentes inorgânicos e dissipação da poropressão e de líquidos e gases.

De acordo com Carvalho (1999) essa proposta de subdivisão dos mecanismos de recalque pode ser comparada a curva teórica de compressibilidade, ilustrada na Figura 13.

Figura 13 – Curva teórica de compressibilidade do RSU.



Fonte: CARVALHO (1999).

Ainda segundo Carvalho (1999), na fase sólida do RSU, pode ocorrer uma divisão em três classes de materiais, que compõem a curva teórica de compressibilidade: materiais inertes estáveis (metais, vidros, entulhos), cujo comportamento pode ser assumido como o de um solo heterogêneo de granulação grossa; materiais altamente deformáveis (fragmentos e caixas de papel, plástico e têxteis), que apresentam grandes recalques e

comportamento anisotrópico e materiais facilmente degradáveis (materiais orgânicos, vegetais, resto alimentares), os quais passam por transformações físico-químicas, em curto espaço de tempo, causando redução e gerando gases e líquidos

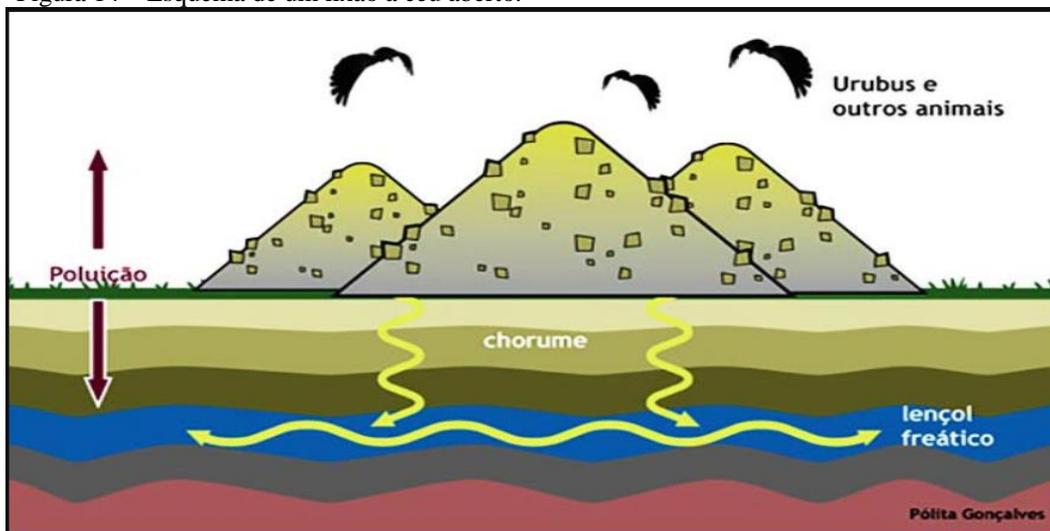
2.2.2 Métodos de Disposição do RSU

Desde a promulgação de lei de nº 12305/2010, no Brasil foi vetado o uso de lixões e aterros controlados como destinação final de resíduos, sendo apenas autorizados o uso de aterros sanitários, entretanto cerca de 40% ainda é destinada para estes locais.

2.2.2.1 Lixão

Os lixões ou vazadouros, são áreas a céu aberto, que são usadas para disposição inadequada de RSU, desprovidas de nenhuma proteção do solo, drenagem superficial, do percolado, de gás e qualquer tipo de impermeabilização, ilustrado na figura abaixo. Sendo foco de sérios problemas socioambientais já citados anteriormente.

Figura 14 – Esquema de um lixão a céu aberto.



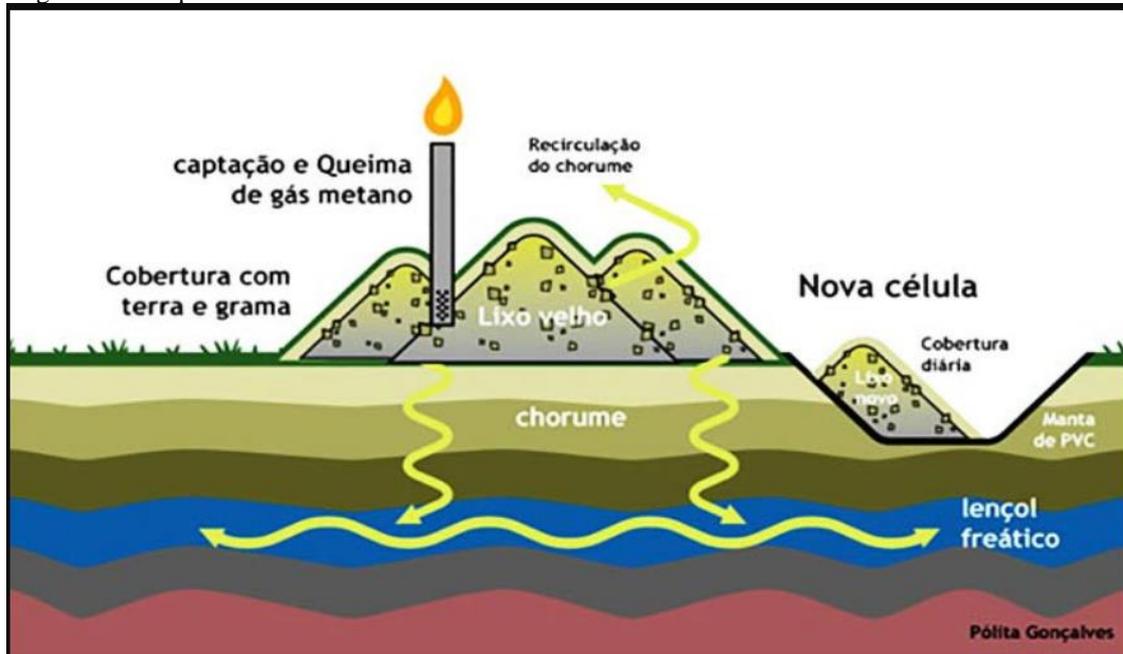
Fonte: Hypeverde (2020).

2.2.2.2 Aterro Controlado

Aterro controlado é uma solução intermediária entre lixão e aterro sanitário, onde uma camada de material como argila, terra e grama é disposta em cima dos resíduos descartados para o isolamento do mesmo, visando a redução da exposição dos resíduos e consequentemente a proliferação de animais e de mal cheiro. Em geral, não é feito nenhum tipo de impermeabilização, coleta e tratamento do material percolado e controle dos gases

gerados. Mesmo sendo uma opção melhor que o lixão, ainda é fonte de poluição do meio ambiente.

Figura 15 – Esquema ideal de um aterro controlado.



Fonte: Hypeverde (2020).

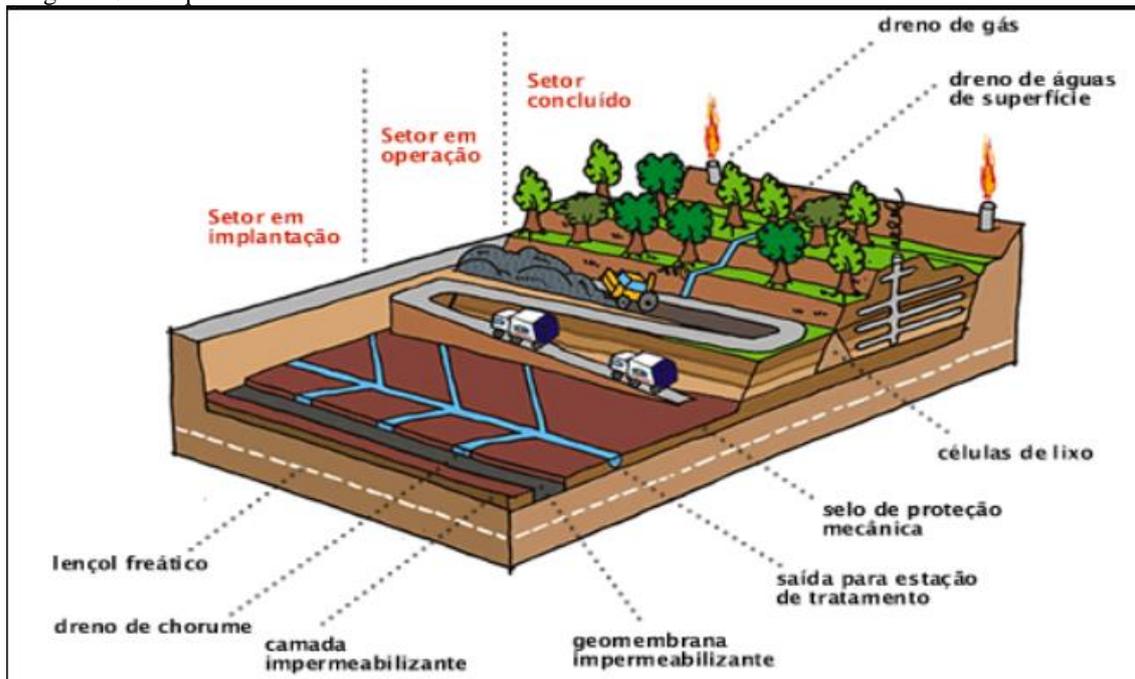
2.2.2.3 Aterro Sanitário

Conforme a NBR 15.849 (ABNT, 2010) aterro sanitário é definido como:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário. (ABNT, 2010, p.1)

Sendo o único método onde se tem controle em todo o processo de disposição de resíduos, o aterro sanitário se torna a única opção correta de armazenamento final de RSU.

Figura 16 – Esquema de um aterro sanitário



Fonte: Vina (2020).

2.3 Projeto de Aterro Sanitário

As normas técnicas responsáveis por definir os critérios para a disposição final de RSU, são a NBR 13.896/1997 Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. E a NBR 15.849/2010 Aterros sanitários de pequeno porte - Diretrizes de locação, projeto, implantação, operação e encerramento, junto com seus respectivos documentos complementares descritos nas mesmas.

2.3.1 Aterro Sanitário de Pequeno Porte

A NBR 13.896 define aterro sanitário de pequeno porte como:

Aterro sanitário para disposição no solo de resíduos sólidos urbanos, até 20 t/dia ou menos, 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 à saúde pública. (ABNT, 2010, p.2)

Podendo apresentar diferentes tipos de instalações para disposição no solo de RSU como em:

- **Valas:** Escavação com profundidade limitada e largura variável, confinada em todos os lados, oportunizando operação não mecanizada.

- **Trincheiras:** Escavação sem limitação de profundidade e largura, que se caracteriza por confinamento em três lados e operação mecanizada.
- **Encosta:** Caracterizada pelo uso de taludes já preexistentes, usualmente implantado em áreas de ondulações ou depressões naturais e encosta de morros
- **Área:** Caracterizada pela disposição em áreas planas acima da cota do terreno natural.

2.3.2 Critérios e Diretrizes para a Localização do Aterro Sanitário

A seleção de um local adequado para implantação de um aterro é fundamental na elaboração do projeto. Segundo (CARVALHO *et al*, 2003) além dos fatores ambientais, outros devem ser levados em consideração, como fatores técnicos, econômicos, legais e sociais em conformidade com condicionantes topográficos, hidrológicos e geotécnicos da área. A NBR 15.849/2010 estabelece que o local para implantação deve ser tal que:

- Minimizar o potencial de impacto ambiental e sanitário associado à instalação, operação e encerramento do aterro, consonância com a legislação ambiental;
- Minimizar os custos envolvidos;
- Maximizar a aceitação da população;
- Esteja de acordo com a legislação de uso e ocupação do solo, com a legislação ambiental e demais normas pertinentes;
- Distância do limite da área útil do aterro a núcleos populacionais vizinhos mínima de 500m;
- A vida útil previsível do aterro sanitário de pequeno porte passível de ser implantado na área deve ser superior a 15 anos.

A NBR 15.849/2010 também estabelece critérios de avaliação da adequabilidade de um local considerando vários aspectos técnicos.

2.3.3 Topografia

O levantamento topográfico é fundamental para obter-se informações sobre a drenagem natural (cursos e corpos d'água) e relevo da região, além de ser fator decisivo na escolha do método de operação, levando em conta a disposição e declividade do terreno. A norma 15.849/2010 recomenda locais com declividade superior a 1% e inferior a 30% e solicita 2 levantamentos planialtimétricos, um com escala não inferior a 1:5000, com

indicação da área do aterro sanitário de pequeno porte, acesso(s) e vizinhança e outro com a área do aterro sanitário de pequeno porte, em escala não inferior a 1:1000.

2.3.4 Caracterização Geológica e Geotécnica

A NBR 15.849/2010 estabelece a obrigatoriedade de investigações que avaliem o risco de poluição das águas, as condições de estabilidade dos maciços e a capacidade de suporte do solo da fundação, constando obrigatoriamente entre as investigações realizadas, o mapeamento de superfície e a sondagem de simples reconhecimento com ensaio SPT (*Standard Penetration Test*), realizados de acordo com a ABNT NBR 6484, além disso solicita ensaios de permeabilidade *in situ* associados, com número de sondagens a ser realizado a permitir a identificação adequada das características do subsolo. Podendo ser tomados como base os ensaios de carga, realizados como ensaios de infiltração ou de rebaixamento, executáveis em furos de sondagem, cavas ou poços.

2.3.5 Caracterização Climatológica

Os aspectos climatológicos da região impactam diretamente em várias fases do projeto, fatores como a precipitação influenciam no dimensionamento do sistema de drenagem do lixiviado e de águas superficiais. Locais com altas temperaturas contribuem para a decomposição dos resíduos orgânicos e conseqüentemente para produção de chorume.

Além dos fatores supracitados, a NBR 15.849/2010 estabelece que outros aspectos, como umidade do ar, evapotranspiração e ventos predominantes, devem ser obtidos com base nas informações disponíveis na estação de tratamento meteorológicas mais próxima, ou nos dados disponibilizados por instituições especializadas em meteorologia, como o Instituto Nacional De Meteorologia (INMET).

Ainda conforme a NBR 15.849/2010, em caso de existência de núcleos populacionais no entorno do aterro, deve ser feito estudos sobre a direção predominante e a intensidade média dos ventos, buscando evitar o carregamento de sólidos, particulados e mal cheiro para as habitações.

2.3.6 Sistemas de Proteção

O sistema de proteção em aterros sanitários é composto pela camada impermeabilizante, sistema de drenagem de águas pluviais, sistema de manejo de lixiviados, drenagem e tratamento dos gases e cobertura camadas de cobertura.

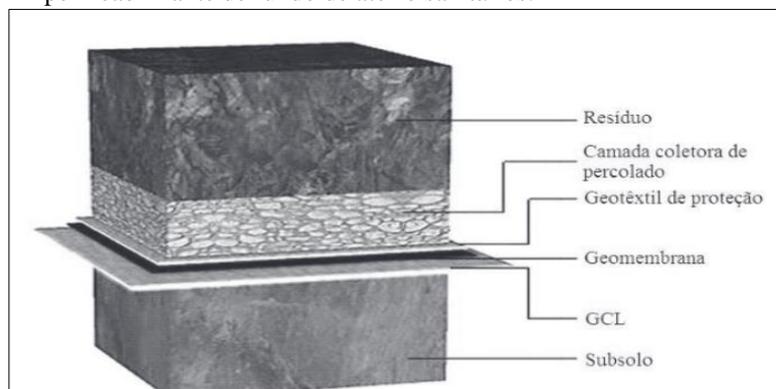
2.3.6.1 Camada impermeabilizante

A impermeabilização da base do aterro, se faz importante pela necessidade de proteção do solo e de aquíferos subjacentes, principalmente devido ao alto teor de contaminação do chorume, que em conjunto com a água da chuva lixiviada ao longo do aterro, pode vir a causar contaminação do solo e dos recursos hídricos da região, além de afetar o funcionamento do aterro.

Segundo (OBLADEN *et al.* 2009), a impermeabilização pode ser executada através de camadas de solos impermeáveis, como argila ou argilas expansivas, ou até mesmo mantas impermeabilizantes de Policloreto de Vinila (PVC) ou Polietileno de alta densidade (PEAD), denominadas de geomembranas sintéticas, sendo estas as mais usadas para a impermeabilização de aterros sanitários. Contudo o uso de geomembranas sintéticas requer uma eficaz proteção mecânica que garanta sua integridade física.

Para proteção mecânica, pode ser usado geotêxteis não tecidos, composto por fibras 100% polipropileno ou poliéster, que não sofre ataques químicos ou biológicos e apresenta alta resistência ao puncionamento. Devido a necessidade de sistemas de drenagens no aterro, os geotêxteis também podem ser usados como elemento filtrante entre o solo e o meio drenante, apresentando uma alta permeabilidade e uma boa retenção de partículas do solo, permitindo assim um livre escoamento do fluido (OBLADEN *et al.* 2009)(Figura 17).

Figura 17 – Exemplo de aplicação de GCLs em barreira impermeabilizante de fundo de aterro sanitários.



Fonte: PIMENTEL (2008).

No caso de aterros sanitários de pequeno porte, se atendidos determinados critérios estabelecidos pela NBR 15.849, pode haver dispensa no sistema de impermeabilização de fundo, nos quais serão apresentados no Quadro 7.

Quadro 7 – Critérios para dispensa do sistema de impermeabilização de fundo.

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

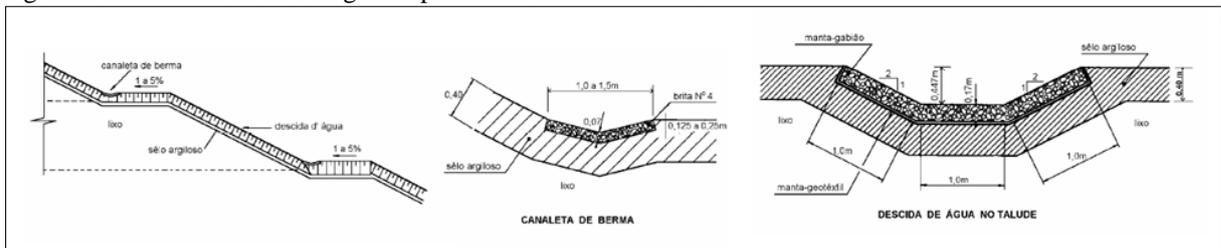
Fonte: Adaptado de ABNT (2010).

2.3.6.2 Sistema de drenagem de águas pluviais

De acordo com Leite (1991 *apud* CARVALHO 1999, p. 24) o sistema de drenagem de águas superficiais, tem como objetivo interceptar e desviar o escoamento de águas pluviais, oriundas da precipitação direta sobre o aterro e escoamento superficial das áreas ao redor, que tendem a percolar através da massa de RSU, podendo causar erosões e carreamento de poluentes.

É importante que esse sistema seja feito com materiais flexíveis, devido à alta deformabilidade da massa de RSU, podendo causar trincas ou rachaduras em estruturas mais rígidas, com isso, é indicado que os sistemas adotados sejam compostos por gabião, brita e/ou rachão, separadas das camadas de recobrimento por mantas geotêxtil. Segundo Tiveron *et al.* (1995 *apud* CARVALHO 1999) os métodos mais utilizados para esse tipo de sistema, são as canaletas de berma e descidas d'água no talude, como ilustrado na figura abaixo. Na região no entorno do aterro pode ser usado sistemas convencionais de drenagem em concreto armado, como canaletas e escadas hidráulicas.

Figura 18 – Elementos de drenagem superficial de aterro sanitário.



Fonte: Adaptado de Carvalho (1999).

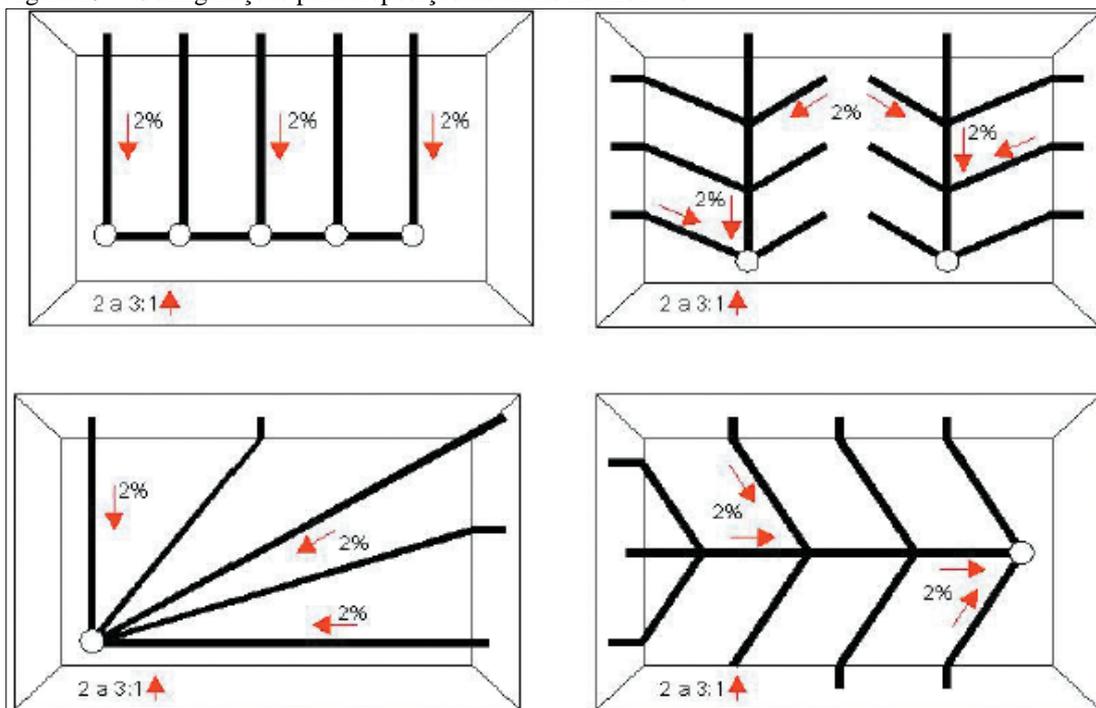
2.3.6.3 Sistema de manejo de lixiviados

A NBR 8419 (1992, p.1) define lixiviado como “deslocamento ou arraste, por meio líquido, de certas substâncias contidas nos resíduos sólidos urbanos”, em geral, esse lixiviado é composto por água proveniente da precipitação que percola através do maciço em

combinação com o chorume produzido pela decomposição da matéria orgânica presente nos RSU. É necessária a execução de um sistema de manejo visando a drenagem e o tratamento de todo o lixiviado, devido ao seu alto teor de contaminação e para evitar acúmulo de líquido na base do aterro, que possam vir a causar danos na estrutura do mesmo.

Segundo (OBLADEN *et al.* 2009) a eficiência do sistema de drenagem depende de um projeto adequado, material de qualidade e uma boa instalação. Existem vários tipos de sistemas drenantes, os mais utilizados são tubos de concreto perfurados, valas em pedra amarrada e/ou brita, termoplásticos como PVC e o PEAD perfurados, rígidos ou flexíveis. O sistema formado por drenos horizontais, devem ter inclinação de fundo de pelo menos 2%, devidamente protegido com o uso de geotêxtil para evitar a sua colmatagem e consequentemente a perda de sua função. Esses drenos podem assumir diferentes formações, dependendo da topografia e geometria do local, algumas dessas formações estão ilustradas na Figura 19.

Figura 19 – Configurações para disposição de dreno horizontalis.



Fonte: ReCESA (2008)

Segundo Oliveira & Pasqual (2000 *apud* PADILLA 2007, p. 21) a quantidade de lixiviado produzido em um aterro depende de vários fatores como: condições meteorológicas locais (umidade, precipitação, evaporação, temperatura e ventos); geologia e geomorfologia (escoamento superficial e/ou infiltração subterrânea, grau de compactação e capacidade dos solos em reter umidade) e idade e natureza dos resíduos sólidos (tipo, umidade, nível de matéria orgânica, características).

A estimativa da geração de lixiviados em aterros sanitários normalmente é calculada utilizando procedimentos empíricos, métodos de balanço hídrico e métodos computacionais.

O método do balanço hídrico é o mais utilizado para aterros de grande porte, devido a sua complexidade e dependência de grande disponibilidade de dados como, precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial e armazenamento de umidade no solo (PADILLA 2007).

No caso de aterros de pequeno porte, pode ser utilizado métodos mais simples de estimativas de volume de lixiviados, como no caso do método empírico suíço, onde:

Estima-se que certa porcentagem da precipitação infiltra nos resíduos, atinge a camada de impermeabilização na base, devendo ser drenada. Esta porcentagem é, normalmente, estipulada em função do peso específico dos resíduos dispostos no aterro e da experiência do projetista. (PADILLA, 2007, p. 35)

A equação responsável pela estimativa de vazão de lixiviado é mostrada na Equação 1. O Quadro 8 apresenta os valores de K para aplicação do método.

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

Onde:

Q = Vazão média do lixiviado (L/s)

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

P = Precipitação média mensal (mm)

A = Área total do aterro (m²)

t = Tempo (s)

Quadro 8 – Valores de K em função do peso específico para aplicação no Método Suíço.

Valores de K – Método Suíço		
Tipo de Aterro	Peso Específico do RSU	K
Aterros Fracamente Compactados	0,4 a 0,7 t/m ³	0,25 a 0,50
Aterros Fortemente Compactados	Acima de 0,7 t/m ³	0,15 a 0,25

Fonte: PADILLA (2007).

De acordo com (ELK, 2007), o sistema de tratamento de lixiviados pode ser feito através de tratamentos biológicos aeróbios ou anaeróbios (lodos ativados, lagoas de estabilização, filtros biológicos) e/ou processos físico-químicos (diluição, filtração, coagulação, floculação, precipitação, sedimentação, adsorção, troca iônica, oxidação química) podendo ser efetuados em combinação.

Ainda segundo (ELK, 2007), outros métodos podem ser utilizados para destinação final desse efluente, como a recirculação do lixiviado no interior da massa de

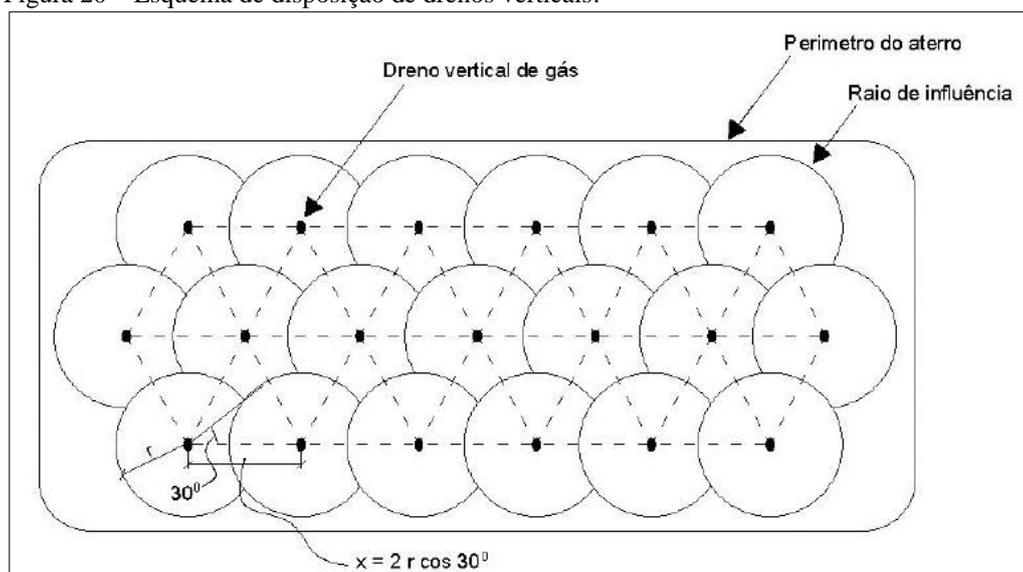
resíduos, que visa manter o grau de umidade necessária para decomposição dos resíduos orgânicos ou o encaminhamento para a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) desde que suportem a carga adicional de volume sem prejudicar seu processo de tratamento.

De acordo com a NBR 15.849, soluções para drenagem, disposição e tratamento de lixiviados devem ser adotados sempre que houver impermeabilização complementar ou quando a permeabilidade do solo entre a base do aterro e o freático possibilitar o acúmulo de líquidos ou comprometer a estabilidade do maciço. Estas soluções podem ser dispensadas quando o balanço hídrico indicar a ausência de líquidos a serem drenados.

2.3.6.4 Drenagem e Tratamento dos gases

O sistema de drenagem de gases tem por finalidade captar os gases gerados pela decomposição da matéria orgânica, também conhecido por biogás, já definido anteriormente. De acordo com ReCESA (2008), esse sistema é formado pela interligação dos drenos verticais com horizontais, dispostos em diferentes pontos do aterro. Normalmente, o raio de influência, ou captação de gás, de cada dreno pode variar entre 15 a 30 metros, como demonstrado na Figura 20, podendo ocorrer ajustes devido a necessidade de ligação com os drenos horizontais. O dimensionamento desses drenos pode ser feito através das equações de fluxo de fluidos em meios poroso, porém, geralmente, é adotado de forma empírica, assim os diâmetros variam entre 50 a 100 cm, em casos de aterros de grande porte e de maior altura podem chegar até 150 cm.

Figura 20 – Esquema de disposição de drenos verticais.



Fonte: ReCESA (2008).

$$Q = k.L.m.e^{-kt} \quad (2)$$

Onde:

Q = metano produzido no ano "i" (m³/ano)

k = taxa de geração de metano

L = potencial de geração de metano em peso de lixo (m³/ton)

m = massa de resíduos depositados no ano "i" (t/ano)

t = anos após o encerramento do aterro (anos)

O cálculo de biogás pelo modelo desenvolvido pela EPA é feito de acordo com o apresentado na equação 3.

$$Q = L.R(e^{-kc} - e^{-kt}) \quad (3)$$

Onde:

Q = quantidade de gás gerado durante um ano (m³/ano)

L = potencial de geração de metano em peso de lixo (m³/t)

R = quantidade anual de resíduos depositados no aterro (t/ano)

k = taxa de geração de metano por ano (1/ano)

t = tempo desde o início da disposição do aterro(anos)

c = tempo desde o encerramento do aterro (anos)

2.3.6.5 Camada de cobertura

De acordo com a NBR 15.849 o sistema de cobertura tem função de evitar a proliferação de vetores, minimizar a formação de lixiviados, reduzir a exalação de odores e liberação de gases na atmosfera, isolar os resíduos e evitar erosão. Esse sistema pode ser dividido entre coberturas diárias, intermediária e final.

A cobertura diária é feita ao término de cada jornada de trabalho, com a disposição de uma camada de solo de cerca de 20 cm (CEMPRE, 2010), visando evitar o espalhamento de matérias leves e proliferação de animais.

Segundo o Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE, 2010, p. 298) "a camada intermediária é necessária naqueles locais em que a superfície de disposição ficará inativa por períodos mais prologados (± 1 mês)" ou após a conclusão de uma etapa (célula) do aterro. Além de apresentar funções sanitárias, já definidas anteriormente, apresenta funções operacionais, permitindo o tráfego de veículos e equipamentos diretamente sobre a camada e o desvio de águas pluviais para o sistema de drenagem superficial. Em geral sua

espessura deve ser a menor possível para que o volume útil do aterro não seja comprometido, sendo utilizados valores entre 20 cm a 40 cm (ReCESA 2008).

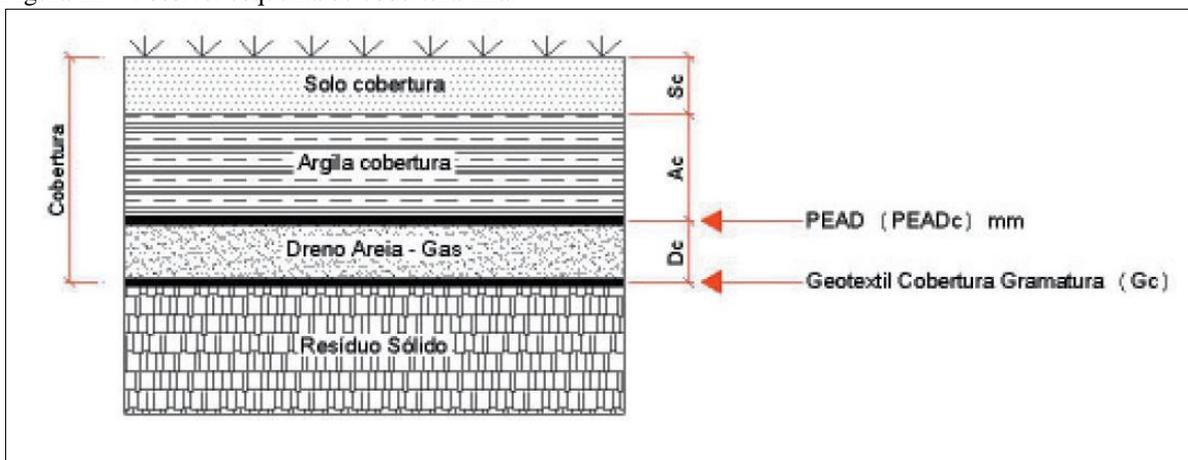
Além de apresentar todas as funções sanitárias supracitadas, de acordo com ReCESA (2008), a camada final deve permitir a recuperação ambiental da área a partir do plantio de vegetação sobre a mesma, sendo muito importante para um aumento da evapotranspiração e escoamento superficial, diminuição da quantidade de percolado e proteção contra a erosão e danos as camadas inferiores.

Essa vegetação não deve possuir raízes que possam penetrar a camada impermeável, além de possuir certa resistência, ser autossuportada e ser densa o suficiente para minimizar a erosão. A espessura da chamada camada vegetal deve ser entre 20 cm e 30 cm, com declividade mínima de 3% a 5%

Ainda segundo ReCESA (2008), os materiais dessa camada devem ser impermeáveis, resistentes a processos erosivos e com capacidade de estabelecimento de vegetação. Pode ser utilizado argilas a serem compactadas até uma permeabilidade de inferior a 1×10^{-5} com espessura mínima de 60 cm, porém, nesse caso essa camada está sujeita a fissuramento devido ao ressecamento e aos recalques diferenciais dos resíduos. Devido a esses fatores, é recomendado o uso de barreiras mais flexíveis, como camadas compostas por argilas e geomembranas de polietileno de muito baixa densidade (PEMBD) ou de PVC com espessura mínima de 0,5mm, como demonstrado na Figura 22.

No caso de uso de camada de cobertura composta (argila + geomembrana), deve-se instalar um dreno horizontal logo abaixo da mesma, com espessura de 15 cm a 20 cm. Esse dreno tem objetivo de conduzir os gases produzidos pelos RSU para os drenos verticais, evitando, assim, pontos de pressão devido ao seu acúmulo, que por sua vez podem causar elevação e ruptura da camada de cobertura ou até a instabilidade geotécnica do aterro (ReCESA, 2008).

Figura 22 – Possível esquema de cobertura final



Fonte: ReCESA (2008).

Materiais alternativos podem ser utilizados para a cobertura final do aterro, como lodos da estação de tratamento de água (ETA) e estação de tratamento de esgoto (ETE), areia de fundição e os entulhos da construção civil, porém todos eles só devem ser utilizados casos sejam classificados como inertes.

3. METODOLOGIA

3.1 Tipologia da Pesquisa

Esta pesquisa pode ser compreendida como uma análise descritiva, e por tratar de uma especificidade do município de Barro/CE, constitui um estudo de caso. Que segundo (GIL, 2012, p. 54) “Consiste no estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos, de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento”. Sendo classificado quanto a natureza da pesquisa como quali-quantitativo ou mista, que segundo Souza e Kerbauy (2017) “a combinação de duas abordagens pode possibilitar dos olhares diferentes, propiciando uma visualização ampla do problema investigado.” No estudo foi descrito os critérios e diretrizes para a implementação de um aterro sanitário de pequeno porte, analisando a viabilidade econômica do município para a aplicação de recursos para a implantação do mesmo.

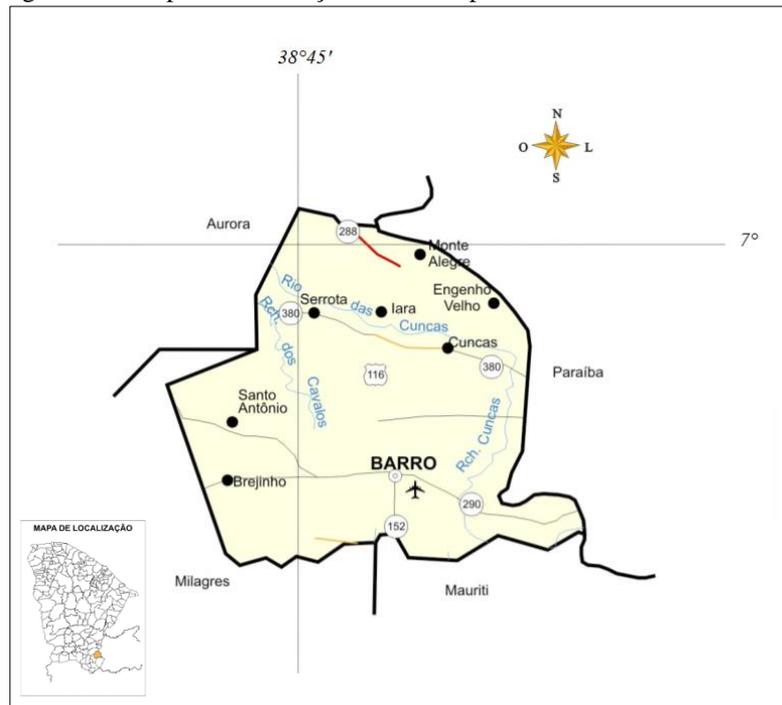
3.2 Caracterização da Área de Estudo

A cidade de Barro situa-se no sul do estado do Ceará, na região do Cariri, com área territorial 711,887 km², distante 440 Km da Capital Fortaleza. De acordo com os dados do (IBGE, 2010) a população no último censo foi de 21.514, estimada para o ano de 2019 em 22.680 pessoas, apresentando densidade demográfica de 30,22 hab/Km².

O município encontra-se inserido na Bacia do Salgado, mais precisamente na latitude 7° 10' 36''S e longitude 38° 46' 54''WGr. Seus limites municipais ao norte: Aurora; ao Sul: Milagres e Mauriti; ao Leste: Estado da Paraíba, Mauriti; ao Oeste: Milagres e Aurora, como demonstrado na Figura 23. (IPECE, 2017)

Possui clima definido como tropical semiárido com temperatura média anual de 24° a 26 °, período chuvoso de fevereiro a abril, precipitação pluviometria média anual de 934,3 mm (IPECE, 2017) e evapotranspiração média anual igual a 1.757,6 mm (FUNCEME, 2016). O relevo da região é caracterizado como depressão sertaneja, com solos aluviais, areias quartzosas, distróficos, bruno não-cálcico, solos litólicos e podzólico vermelho-amarelo. Composto por vegetação de floresta caducifólia espinhosa e floresta subcaducifólia tropical pluvial (IPECE, 2017).

Figura 23 – Mapa de localização do Município de Barro/CE.



Fonte: Adaptado de IPECE (2009).

Em relação ao trabalho e rendimento do município, de acordo com IBGE (2017), o salário médio mensal era de 1.4 salários mínimos e o percentual da população com rendimento nominal mensal per capita de até 10/2 salário mínimo no ano de 2010 é de 54,5%. A proporção de pessoas ocupadas em relação à população total era de 6.3%.

O município possui PIB per capita de R\$ 8.004,62. Seu Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) que é composto pelas mesmas dimensões do Índice de Desenvolvimento Humano Global – IDH Global (longevidade, educação e renda), vem crescendo ao longo das décadas, devido ao crescimento dos índices de seus componentes como pode ser visto na Figura 24. Apesar disso no ano de 2010 seus IDHM foi apenas de 0,599, sendo considerado baixo de acordo com os parâmetros estabelecidos para o IDHM, do qual, é representando por um número que varia entre 0 e 1, quanto mais próximo de 1, maior o desenvolvimento humano.

Figura 24 – Índice de Desenvolvimento Humano Municipal e seus componentes.

IDHM e componentes	1991	2000	2010
IDHM Educação	0,095	0,243	0,510
% de 18 anos ou mais com fundamental completo	8,68	15,13	32,94
% de 5 a 6 anos na escola	26,76	77,68	96,73
% de 11 a 13 anos nos anos finais do fundamental REGULAR SERIADO ou com fundamental completo	7,19	30,23	79,07
% de 15 a 17 anos com fundamental completo	3,98	10,43	50,81
% de 18 a 20 anos com médio completo	1,68	4,84	27,53
IDHM Longevidade	0,630	0,727	0,758
Esperança de vida ao nascer	62,81	68,60	70,49
IDHM Renda	0,392	0,488	0,556
Renda per capita	91,52	166,99	254,44

Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil (2013).

A maior parte das receitas do município provém de fontes externas totalizando 95,1%. (IBGE, 2015). Sendo seu total realizado em 2017 de R\$ 41.340,96 (x1000) e empenhadas de R\$ 39.319,66 (x1000).

O município também apresentou melhoras nos seus índices de saúde ao longo das décadas, como longevidade e mortalidade infantil, ilustrados na figura 25. Tendo uma redução na mortalidade infantil no ano de 2017 para 11,63 óbitos por mil nascidos vivos. (IBGE, 2017)

Figura 25 – Longevidade, Mortalidade e Fecundidade - Município - Barro - CE

	1991	2000	2010
Esperança de vida ao nascer	62,8	68,6	70,5
Mortalidade infantil	56,8	37,9	25,0
Mortalidade até 5 anos de idade	74,8	49,0	26,9
Taxa de fecundidade total	4,9	3,2	2,2

Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil (2013).

3.3 Planejamento da Pesquisa

Este trabalho tem como objeto de estudo o aterro sanitário de pequeno porte, portando será abordado como é feita a escolha do local e quais os critérios e diretrizes para sua implementação. Inicialmente seria proposto um aterro de pequeno porte para a disposição de todo o RSU do município, porém devido a inserção do município no consórcio COMARES/UMI e as projeções de geração de RSU acima de 20 toneladas/dia a partir de 2022, indo contra o critério de aterro de pequeno porte estipulado pela NBR 15489, foi decidido pela elaboração da proposta de projeto para os rejeitos do município, visando reduzir os impactos socioambientais causados pela disposição inadequadas, até que o aterro do consórcio COMARES/UMI fique pronto.

Os procedimentos relativos à execução das etapas desse deste trabalho, são mostrados na Figura 26.

Figura 26 – Fluxograma de elaboração do projeto e aterro sanitário.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Abastecimento de água e esgotamento sanitário município de Barro/CE

O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) dispõe de vários indicadores de água, esgoto e resíduos sólidos, para criar um panorama geral da situação desses elementos no município. Os indicadores relativos aos parâmetros de água estão ilustrados no Quadro 10. Ressalta-se que os indicadores de água e esgoto do município foram atualizados no SNIS até o ano de 2018, o município não forneceu os dados de resíduos sólidos para a elaboração dos seus índices.

Quadro 10 – Indicadores de Água – Barro/CE.

INDICADORES DE ÁGUA			
Indicador	Nome	Breve Descrição	Valor
IN009	Índice de hidrometração	Percentual de ligações ativas de água micromedidas em relação ao total de ligações ativas.	100,00%
IN011	Índice de macromedição	Percentual do volume de água disponibilizado medido por hidrômetros na saída das ETAs, UTCs ou dos poços.	100,00%
IN022	Consumo médio per capita de água	Média de consumo diário por habitante atendido com rede geral de abastecimento de água.	113,33 L/hab./dia
IN023	Índice de atendimento urbano de água	Parcela da população urbana efetivamente atendida por rede de abastecimento de água em relação à população urbana residente dos prestadores que responderam o SNIS, no ano de referência.	76,59%
IN049	Índice de perdas na distribuição	Percentual do volume total de água disponibilizado que não foi contabilizado.	29,60%
IN051	Índice de perdas por ligação	Volume médio diário de água não contabilizado ou perdido por ligação ativa de água.	144,29 L/hab./dia
IN055	Índice de atendimento total de água	Parcela da população total (urbana e rural) efetivamente atendida por rede de abastecimento de água em relação à população total residente dos prestadores que responderam o SNIS, no ano de referência.	46,85%

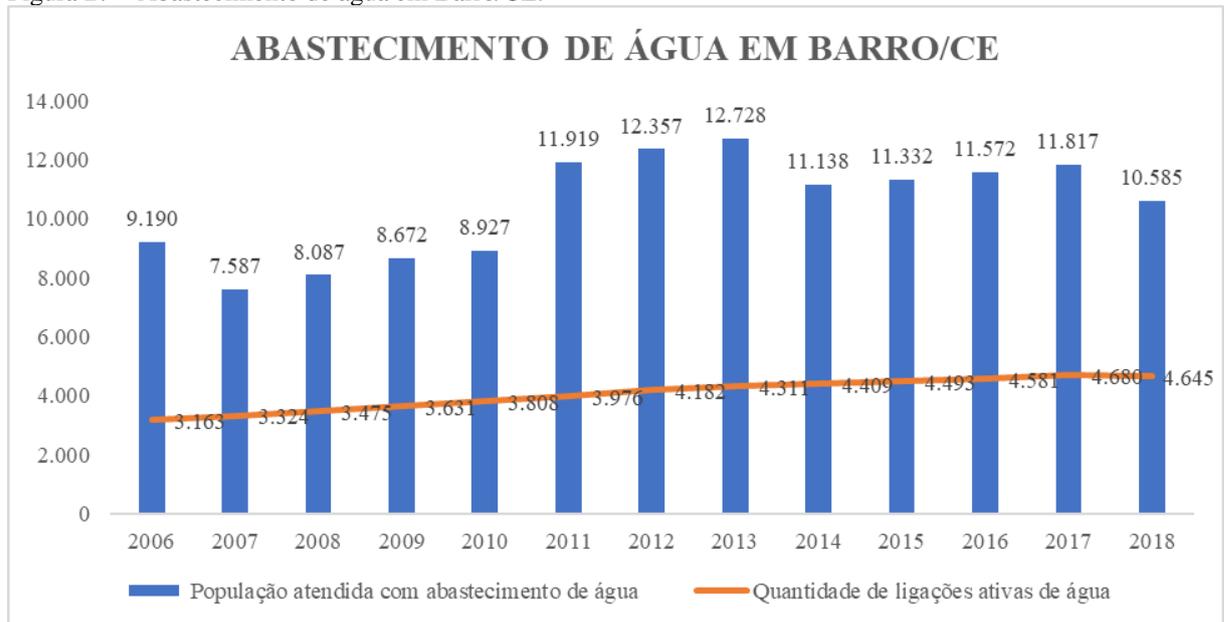
Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Os indicadores de água do município são alarmantes, apenas 46,85% da população total é efetivamente atendida por meio da rede de abastecimento, apesar que o índice de abastecimento da população urbana ser um pouco mais alto, por volta de 76,59%,

ainda apresenta um valor muito baixo, onde quase 35% tem acesso a água de formas não de qualidade não testada. Além disso, para piorar o cenário, o município apresenta um volume de água não contabilizada ou que foi perdido maior que o consumo por habitante atendido pela rede de abastecimento sendo 144,29 L/hab/dia desperdiçados enquanto o consumo médio equivale a 113,33L/hab/dia.

Apesar do crescimento de ligações ativas no, como demonstrado na Figura 27, em 10 anos, apenas 1.482 novas ligações foram feitas, sendo em média 148 ligações ativas por ano.

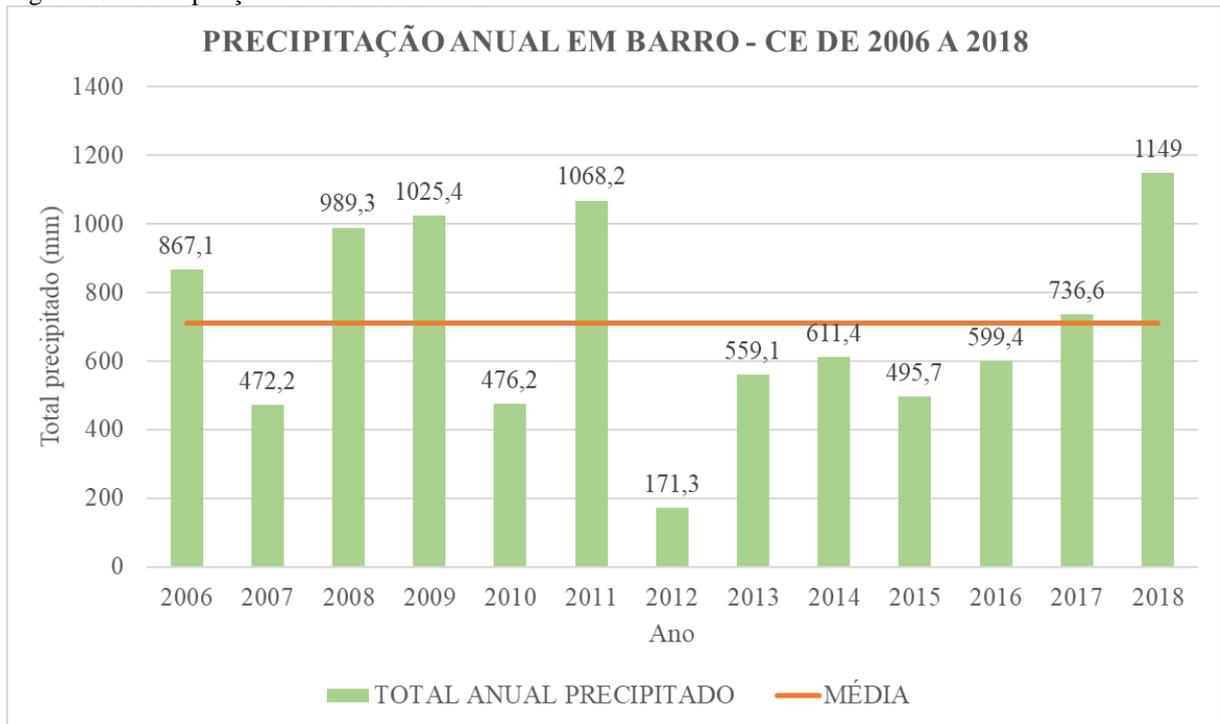
Figura 27 – Abastecimento de água em Barro/CE.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

A Figura 28 mostra o total precipitado no município de Barro, segundo a série histórica da FUNCEME. Pode-se observar que o município, constituinte do semiárido cearense, além de possuir média de precipitação baixa (abaixo de 700 mm), teve, nos últimos anos, vários registros de total anual precipitado abaixo da média.

Figura 28 – Precipitação anual em Barro-CE.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

A Figura 29 mostra o número de amostras fora do padrão para o parâmetro turbidez, com base nos dados disponibilizados no SNIS.

Figura 29 – Amostras fora do padrão para turbidez.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Com base na Figura 28 e na Figura 29, pode-se notar uma correlação da qualidade da água levando em consideração os parâmetros de turbidez, com a média de precipitação do município. Os anos com baixos índices pluviométricos tendem a ter um maior número de

amostras fora dos padrões, como nos anos de 2007 e 2012, onde coincide um aumento significativo nos números de amostras fora do padrão com as menores taxas de precipitação registradas, tendo um aumento 75,223% no pior ano registrado, apesar do aumento da precipitação nos anos de 2013 a 2018, o número de amostras fora do padrão não voltaram aos seus níveis anteriores como ocorreu nos anos de 2008 e 2009, onde o aumento da precipitação diminuiu o número de amostras fora do padrão. Nota-se que o padrão

Os indicadores do SNIS relativos aos parâmetros de esgoto estão ilustrados no Quadro 11.

Quadro 11 – Indicadores de Esgoto – Barro/CE.

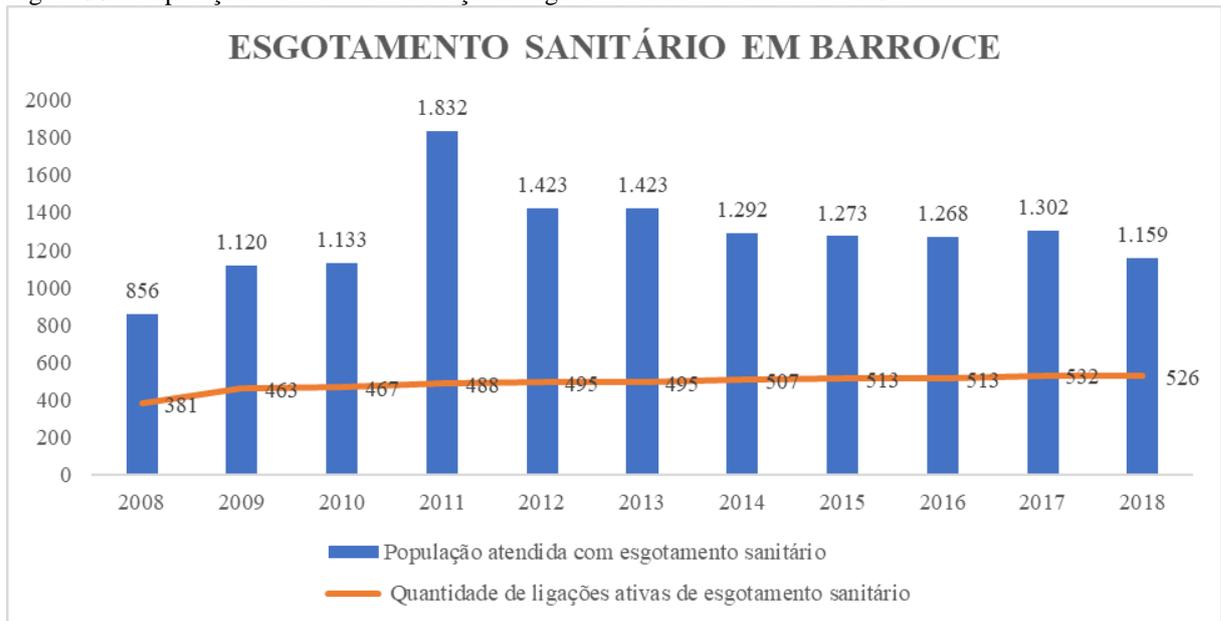
INDICADORES DE ESGOTO			
Indicador	Nome	Descrição	Valor
IN016	Índice de tratamento de esgoto	Percentual do volume de esgoto que foi submetido a tratamento em relação ao volume de esgoto coletado por meio de rede.	100,00%
IN024	Índice de atendimento urbano de esgoto referido aos municípios atendidos com água	Parcela da população urbana que foi efetivamente atendida por rede coletora de esgoto em relação à população urbana residente dos prestadores que responderam o SNIS, no ano de referência.	8,39%
IN046	Índice de esgoto tratado referido à água consumida	Percentual do volume de esgoto que foi submetido a tratamento em relação ao volume de esgoto gerado. Estima-se o volume de esgoto gerado como sendo igual ao volume de água consumido.	7,79%
IN056	Índice de atendimento total de esgoto referido aos municípios atendidos com água	Parcela da população total (urbana e rural) que foi efetivamente atendida por rede coletora de esgoto (com ou sem tratamento) em relação à população total residente dos prestadores que responderam o SNIS, no ano de referência.	5,13%

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Apesar do índice de tratamento de esgoto submetido a tratamento em relação ao volume de esgoto coletado por meio de rede ser de 100%, o que teoricamente seria positivo para o município, a parcela total de esgoto recolhido é muito pequena e não há dados sobre a destinação final do esgoto da população que não é atendida pela rede coletora de esgoto.

A Figura 30 mostra a relação da população total do município que é atendida com rede de esgotamento sanitário e o número de ligações ativas na rede de coleta.

Figura 30 – População atendida com serviço de esgotamento sanitário em Barro-CE.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Pelas condições socioeconômicas da região, pode-se admitir que grande parte desse esgoto é despejada no meio ambiente com pouco ou nenhum tipo de tratamento, gerando diversos problemas ambientais, sanitários e econômicos. Os dados apresentados são preocupantes, como podemos ver também na imagem abaixo, onde a população atendida com esgotamento sanitário vem sendo reduzida desde 2011 e no período de 2008 a 2018 só houve o acréscimo de 303 ligações ativas em 10 anos.

4.2 Diagnóstico dos resíduos sólidos no município de Barro/CE

Quanto aos resíduos sólidos urbanos, de acordo com o município de Barro, verificou-se que há uma geração de resíduos sólidos em área urbana de 11 toneladas, sendo população urbana de 13.160 habitantes, resultando em geração per capita de 0,87 Kg/dia, com índice de coleta de 54,37% (CEARÁ, 2018a). Vale ressaltar que no município não existe disposição final adequada para os RSU, todos os resíduos são depositados no lixão da cidade, a cerca de 3,1 Km ao norte do centro urbano da cidade, tendo acesso pelo Km 446, da Rodovia BR-116.

De acordo com Ceará (2018a), o lixão possui área aproximada de 2,8 hectares, com volume de resíduos estimados em aproximadamente 1.900 m³, segundo cubagem feita a partir de levantamento planialtimétrico realizado em maio de 2017. Esse lixão recebe todos os tipos de resíduos, foram identificados ainda resíduos da construção civil, resíduos provenientes de abatedouros /granjas locais e inclusive os resíduos de saúde, que são enterrados em uma vala dentro do lixão.

Além disso, foi estimado por Ceará (2018b) a população e a geração de RSU para os anos entre 2018 a 2037 para o município, ilustrados no Quadro 12. Estimou-se, também, a quantidade de rejeitos do município para o ano de 2024, totalizando 6,91 toneladas por dia.

Quadro 12 – Resumo de geração de RSU em Barro /CE.

Estimativa populacional e de quantidade de RSU do município de Barro-CE							
Ano	2018	2022	2024	2026	2030	2034	2037
População	22.801	23.473	23.816	24.165	24.877	25.641	26.174
Geração de RSU em toneladas/dia	19,84	20,42	20,72	21,02	21,64	22,28	22,77

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Nesse contexto, o município de Barro está inserido no Consórcio COMARES/UMI, da região do Cariri, com previsão de instalação de aterro sanitário em Milagres, porém ainda não há data para implantação.

De acordo com os dados coletados na secretaria de infraestrutura do município, a quantidade estimada de RSU gerado por dia no município de barro e seus distritos é equivalente a 14 toneladas, diante disso, são geradas 420 toneladas por mês de RSU. Para a estimativa do volume médio coletado, foi feita a divisão da quantidade diária de RSU gerado pelo seu peso específico, que de acordo com a secretaria de infraestrutura do município equivale a 393,94 Kg/m³, logo o volume médio coletado por dia é igual a 35,54 m³, tendo assim uma média mensal de 1.066,20 m³/mês.

Do total de volume de RSU gerado mensalmente, os resíduos sólidos domiciliares têm uma taxa per capita de 69,24%, representando assim 738,23 Kg/m³. O montante restante é proveniente de serviços de limpeza urbana, pequenos estabelecimentos comerciais, indústrias e de prestação de serviços, que estejam incluídos no serviço de coleta regular de resíduos e, que tenham características similares aos resíduos sólidos domiciliares.

Ainda de acordo com a secretaria de infraestrutura do município do Barro, o perímetro urbano da cidade é equivalente a 68 Km, sendo interligados por 2 vias, resultando em 34 Km ou 34.000 metros por via, onde é feita a varrição, poda de árvores, capina e roçagem, onde a capina consiste na limpeza das vias, no que tange à vegetação herbácea (capim). São indicadas em vias pavimentadas ou carroçáveis (onde nasce capim junto às sarjetas, entre blocos de paralelepípedos, em frestas no asfalto e em torno de árvores e poste), áreas planas ou de pequena inclinação e onde um melhor acabamento se fizer necessário. O mato, o capim e as ervas daninhas trazem real prejuízo à limpeza urbana, pois ocasionam o acúmulo de lixo lançado pelos moradores, embora a coleta seja realizada regularmente e a roçagem consiste no corte da vegetação a uma altura de 5,0 a 10,0 cm acima do solo, deixando as raízes. É feita quando se deseja manter uma cobertura vegetal para se evitar deslizamentos

de terra e erosões ou por razões estéticas. Só é aplicada onde se deseje um resultado mais rápido e de menor custo, com um menor padrão de acabamento. Também é aconselhada em encostas e taludes, onde uma capina frequente poderia desestabilizar o solo.

Para realização desses serviços, o município tem um quadro de funcionários terceirizados e equipamentos específicos para cada serviço, mostrado no Quadro 13.

Quadro 13 – Quadro de funcionários de limpeza urbana.

Item	Especificação	Coleta transporte tratamento destinação	Varrição manual de vias	Capina manual e raspagem de vias	Pintura de guias de vias	Roçagem manual e mecânica de vias	Poda arbórea limpeza rebaixamento conformação
1.0	FUNCIONÁRIOS						
1.1	Chefe de Equipe	3,00					
1.2	Gari Coletor	4,00					6,00
1.3	Gari Varredor		20,00				
1.4	Capinador			13,00			
1.5	Pintor				2,00		
1.6	Podador						5,00
1.7	Roçador					2,00	
1.8	Motorista	3,00					
	Subtotal 1.0	10,00	20,00	13,00	2,00	2,00	11,00
2.0	VEÍCULOS						
2.1	Caminhão Lixo	1,00					
2.2	Caminhão Poda	2,00					
	Subtotal 2.0	3,00					
	Total	10,00	20,00	13,00	2,00	2,00	11,00

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

O município apresenta um plano de coleta de RSU onde apresenta as diretrizes que devem ser seguidas pelo município e sua população para a melhor realização desse serviço.

Nesse plano a cidade foi dividida em subáreas que recebem o nome de zonas geradoras de lixo (ZGL), onde a coleta é efetuada, de segunda a sexta, das 7:00 às 17:00 horas, com intervalo entre as 11:00 e 13:00 horas, com tempo de descarga e tempo de coleta improdutiva de 2 horas. Aos sábados é realizada em apenas um turno, das 7:00 às 11 horas. Em dias de feiras livres é feita uma coleta especial, geralmente nas Segundas feiras.

No total, o município foi dividido em 7 bairros com diferentes rotas, detalhadas no Quadro 14.

Quadro 14 – Divisão de rotas por bairros.

Zona	Bairro	Frequência	Nº de Viagens
ZGL1	Trajano Nogueira	Terças, Quintas, Sábados	1
ZGL2	Raimundo Inácio/Iara/Monte alegre	Terças, Quintas, Sábados	1
ZGL3	Vila Cardoso	Terças, Quintas, Sábados	1

ZGL4	Centro	Diariamente	1
ZGL5	Populares/ Jardim/ Cuncas	Segundas, Quartas, Sextas	1
ZGL6	Poço da Pedra	Segundas, Quartas, Sextas	1
ZGL7	São José/Baixio Velho/S. Antonio	Segundas, Quartas, Sextas	1

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

As rotas e itinerários da ZGL1, que abrange o bairro Trajano Nogueira são mostrados no Quadro 15.

Quadro 15 – Detalhamento da ZGL1.

Rotas	Itinerários	Logradouros	Extensão (km)
ZGL1	Garagem		
		Patagônia	0,2
		Av. Januário Feitosa	1
		Av. Vicente Leite	1
		Av. Anderley Cardoso	0,6
		Rua Trajano Nogueira	0,6
		Rua Agostinho Xavier	0,3
		Rua Roque Ribeiro	0,3
		Rua Joaquim Ferreira	0,3
		Descarga(lixão)	5

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

As rotas e itinerários da ZGL2, que abrange os bairros Raimundo Inácio/Iara/Monte alegre são mostrados no Quadro 16.

Quadro 16 – Detalhamento da ZGL2.

Rotas	Itinerários	Logradouros	Extensão (km)
ZGL2	Garagem		
		Rua Alaíde Feitosa	1
		Rua José Inácio de Sousa	1,5
		Rua Zumira Fernandes	0,5
		Rua Crisantina Monteiro	0,5
		Rua Padre Monteiro	0,4
		Rua Raimundo Inácio	0,4
		Distrito (iara/monte alegre)	16
		Descarga(lixão)	6

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

As rotas e itinerários da ZGL3, que abrange o bairro Vila Cardoso são mostrados no Quadro 17.

Quadro 17 – Detalhamento da ZGL3.

Rotas	Itinerários	Logradouros	Extensão (km)
ZGL3	Garagem		
		Av. Alderley Cardoso	1

	Rua Raimundo Inácio	0,6
	Rua Agostinho Xavier	0,3
	Rua Santo Antônio	0,3
	Rua Trajano Nogueira	0,4
	Av. Vicente Alves	1
	Descarga(lixão)	4

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

As rotas e itinerários da ZGL4, que abrange o bairro Centro são mostrados no Quadro 18.

Quadro 18 – Detalhamento da ZGL4.

Rotas	Itinerários	Logradouros	Extensão (km)
ZGL4	Garagem		
		Patagônia	0,2
		Av. Januário Feitosa	2
		Rua Major Januário	0,3
		Rua Firmino Tavares	0,7
		Rua Justino Alves Feitosa	0,7
		Rua Jose Leite Cabral	0,3
		Rua Raimundo Inácio	0,3
		Praça Gregório Alves	0,3
		Descarga(lixão)	6

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

As rotas e itinerários da ZGL5, que abrange os bairros Populares/ Jardim/ Cuncas são mostrados no Quadro 19.

Quadro 19 – Detalhamento da ZGL5.

Rotas	Itinerários	Logradouros	Extensão (km)
ZGL5	Garagem		
		Av. Januário Feitosa	2
		Rua Jose Inácio De Sousa	0,6
		Rua 06 (Jardim)	0,2
		Rua 04 (Jardim)	0,2
		Rua João Tavares	0,4
		Distrito de Cuncas	18
		Descarga(lixão)	12

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

As rotas e itinerários da ZGL6, que abrange o bairro Poço da Pedra são mostrados no Quadro 20.

Quadro 20 – Detalhamento da ZGL6.

Rotas	Itinerários	Logradouros	Extensão (km)
ZGL6	Garagem		

	Patagônia	0,2
	Av. Januário Feitosa	2
	Rua Mundoca Tavares	0,4
	Rua Joaquim Patrício	0,3
	Rua Julho Tenório	0,4
	Rua Raimundo Inácio	0,4
	Descarga(lixão)	6

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

As rotas e itinerários da ZGL7, que abrange os bairros São José/Baixio Velho/S. Antônio são mostrados no Quadro 21.

Quadro 21 – Detalhamento da ZGL7.

Rotas	Itinerários	Logradouros	Extensão (km)
ZGL7	Garagem		
		Rua Januário Feitosa	2
		Baixio Velho	2
		Distrito Santo Antônio	21
		Rua José Lira Sobrinho	0,6
		Rua Pedro Damásio	0,3
		Rua Soledade André	0,3
		Rua Metre Bizil	0,3
		Descarga(lixão)	6

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

A coleta sempre é efetuada nos mesmos dias e horários do cronograma, para que a população possa se habituar a colocar os recipientes de lixo, que devem ser cestos com tampa, nas frentes de seus imóveis.

De acordo com a Secretaria de Infraestrutura do município, a frota necessária para coleta de cada zona (Quadro 22) foi estimada a partir da fórmula sugerida pelo Manual de Saneamento elaborado pela Funasa, aplicável a cidades pequenas, que relaciona a quantidade de veículos com a quantidade de lixo a ser coletada e o número de viagens por dia (respeitando o valor máximo de três viagens diárias).

Quadro 22 – Detalhamento da frota de cada zona.

Zona	Lc (t)	Cv (t)	Nv	Nº dias c/ geração de lixo na semana	Nº dias c/ coleta na semana	Fr	Nf
ZGL1	1,4	12	1	7	3	2,3	0,32
ZGL2	1,5	12	1	7	3	2,3	0,34
ZGL3	1,6	12	1	7	3	2,3	0,36
ZGL4	2,6	12	1	7	3	2,3	0,55
ZGL5	2,1	12	1	7	3	2,3	0,48

ZGL6	2,4	12	1	7	3	2,3	0,55
------	-----	----	---	---	---	-----	------

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

4.3 Recursos financeiros destinados aos resíduos sólidos no município de Barro/CE

Devido à dificuldade de acesso, desorganização nos documentos encontrados e falta de dados financeiros do município, a análise orçamentaria para a viabilidade de execução e manutenção de um aterro sanitário de pequeno porte com recursos próprios foi inviabilizada, o município deveria encontrar meios mais práticos e organizados de disponibilizar dados orçamentários para a população, não apenas para pesquisa de dados, como também para facilitar a fiscalização das atividades públicas.

Dos dados coletados junto da secretaria municipal de infraestrutura sobre os gastos mensais estimados da gestão de RSU municipal, tem-se que o gasto mensal com equipamentos usados na coleta, transportes, destinação de RSU e limpeza municipal, que consiste em um caminhão compactador e um caminhão de carroceria, ver Quadro 13 para mais detalhes, equivale a R\$ 9.577,94.

Em relação a mão de obra, que é composta por chefe de equipes, garis, capinadores, podadores, roçadores e motoristas, com mais detalhes no Quadro 13, tem um custo mensal estimado de R\$ 69.770,32, somados com os encargos trabalhistas e sociais equivalentes a R\$ 51.099,78, se tem o total mensal de 120.870,10.

Somando os gastos com mão de obra, equipamentos e despesas indiretas, temos que o município do Barro, gasta mensalmente R\$ 139.775,07 com a gestão de RSU municipal, vale ressaltar que não ocorre nenhum tipo de tratamento dos RSU coletados, onde sua disposição final é feita no lixão municipal.

4.4 Aterro sanitário simplificado para o município de Barro/CE

Devido à falta de estudos sobre a caracterização do solo e mapas planialtimétricos e a impossibilidade de realização dos mesmos pelo autor, foi necessário estabelecer parâmetros hipotéticos ideais para a realização do estudo. A área necessária para a implantação do aterro é de 109.497 m² sendo um quadrado de 323 x 339 metros.

A localização sugerida para o aterro fica no Km 446 da Rodovia BR-116, próximo ao lixão municipal, com latitude 7° 7'50.45"S e longitude 38°47'3.76"O, a inclinação do terreno é de 17°, dentro das recomendações estabelecidas pela NBR 15849

(Figura 31). As vias de acesso ao aterro e as de circulação interna, devem garantir o acesso permanente dos veículos coletores de resíduos, caso necessário se construirá uma edificação de apoio, dotada de instalações necessárias à permanência prolongada do funcionário incumbido do controle.

Figura 31 – Área destinada ao aterro sanitário.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2021).

Deve ser realizado o isolamento do aterro, por meio de barreira física, que impeça o acesso de pessoas e animais, acompanhado de cerca viva arbustiva ou arbórea, ao longo de todo o perímetro do aterro e de faixa de proteção sanitária e controle com aceiro para prevenção de incêndios.

Foi realizada a estimativa populacional de acordo com o método aritmético, para o tempo mínimo de 15 anos de funcionamento do aterro sanitário de pequeno porte, considerando que a produção per capita não se altere ao longo dos anos e o peso específico adotado para resíduos novos, não decompostos com pouca compactação equivalente a mais ou menos 600 Kg/m^3 .

Preferencialmente em aterros sanitários de pequeno porte devem contemplar a técnica de operação em valas, onde a profundidade máxima é de 3,0 metros. Sua largura pode variar decorrente do equipamento de escavação, porém, recomenda-se uma largura de vala na superfície inferior a 5 metros, que foi a largura adotada para o projeto. Tendo o formato trapezoidal com a base maior(superior) equivalente a 5 metros e a menor(inferior) a 3 metros

e com um crescimento de volume devido a taxa de cobertura de 15%, o comprimento de cada vala pode ser visto no Quadro 1Quadro 23.

Quadro 23 – Detalhamento do comprimento da vala.

Ano	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
População	22884	23021	23158	23295	23432	23569	23706	23843	23980	24117	24254	24391	24528	24665	24802
Kg/hab/dia	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
Kg/dia	14074	14158	14242	14326	14411	14495	14579	14663	14748	14832	14916	15000	15085	15169	15253
Volume/mês	809,24	814,08	818,92	823,77	828,61	833,46	838,3	843,15	847,99	852,84	857,68	862,53	867,37	872,22	877,06
Comprimento	67	68	68	69	69	69	70	70	71	71	71	72	72	73	73

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

A escavação de cada vala deve ser executada de uma só vez e suas dimensões foram calculadas para se ter uma vida útil equivalente a 30 dias. Com isso cada etapa do projeto corresponde a 1 ano, totalizando 15 etapas, que serão compostas por 12 valas por etapa com separação entre suas bordas superiores de 1 metro e 3,5 metros para separação entre uma nova etapa e outra, para facilitar o acesso permanente a novos conjuntos de valas por veículos coletores ou maquinário usado para escavação e compactação das valas

Em certos casos o sistema de impermeabilização em aterros sanitários de pequeno porte pode ser dispensado, porém devido a falta dos estudos necessários, a impermeabilização será considerada e feita com geomembranas sintéticas, podendo ser substituída por argila ou argilas expansivas caso sua disponibilidade seja de mais fácil acesso. Devido ao uso de geomembranas sintéticas, se faz necessário a realização de proteção mecânica, podendo ser usado geotêxtis não tecidos, compostas por fibras 100% polipropileno ou poliéster, servindo também como elemento filtrante para o sistema de drenagem, evitando assim sua colmatação.

O cálculo do lixiviado foi realizado através do método suíço, demonstrado na Equação 1, levando em consideração a série histórica. Vale ressaltar que apesar da média mensal de precipitação estar por volta de 60 mm, durante os meses de janeiro a maio é onde ocorre a maior parte da precipitação enquanto os outros meses praticamente não há ocorrência de precipitações na região. Os dados resultantes do cálculo do volume do lixiviado são apresentados no Quadro 24.

Quadro 24 – Cálculo do lixiviado de 2021 a 2035.

Ano	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Comprimento (m)	67	68	68	69	69	69	70	70	71	71	71	72	72	73	73
Área por vala (m²)	337	339	341	343	345	347	349	351	353	355	357	359	361	363	365
Vazão de lixiviado/vala (L/s)	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Vazão de lixiviado p/ etapa (L/s)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Vazão de lixiviado acumulada (L/s)	0,05	0,09	0,14	0,19	0,24	0,29	0,33	0,38	0,43	0,48	0,53	0,58	0,63	0,68	0,73

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

No pior cenário, a produção de lixiviados será de 0,73 L/s, vale destacar que, com o fechamento das valas e degradação da matéria orgânica ao longo do tempo, a quantidade

de lixiviado gerador tende a diminuir com a conclusão das etapas de projeto, logo, dificilmente conseguirá atingir o pico máximo de produção do lixiviado.

O tratamento e destinação final do lixiviado deve ser realizada de acordo com a legislação ambiental vigente no município, apresentando forma de coleta do lixiviado e definindo o nível de eficiência de tratamento pretendido no local de lançamento do afluente tratado.

O sistema de drenagem de lixiviados consistirá em tubos de PVC ou PEAD perfurados, rígidos ou flexíveis. Será localizado no eixo da vala através de uma tubulação primária que atravessará todo o comprimento da vala, somada as tubulações secundárias, em formato de espinha de peixe, com inclinação mínima de 2%.

No caso de aterros sanitários de pequeno porte o sistema de drenagem de gases, pode ser dispensado levando em consideração a altura final do aterro e a fração orgânica de resíduos, como a altura final do aterro é de 3 metros, não se faz necessário o uso de sistemas de drenagem de gases.

As camadas de coberturas diárias devem ser realizadas de forma que sua altura não comprometa a altura final do aterro, podendo ser feita com o solo proveniente da escavação da vala. A camada de cobertura final do aterro deve ser constituída de camada mínima e contínua de 1 metro de solo compactado para evitar a acumulação de água após um possível recalque, podendo ser usado argila ou geomembranas de polietileno de baixa densidade (PEMBD) ou de PVC com espessura mínima de 0,5mm.

Posteriormente essa camada deve ser coberta com solo orgânico e cobertura vegetal visando a recuperação da área a partir de plantio de vegetação sobre a mesma, sendo muito importante para um aumento da evapotranspiração e escoamento superficial, diminuição da quantidade de percolado e proteção contra a erosão e danos as camadas inferiores. Essa vegetação não deve possuir raízes que possam penetrar a camada impermeável, além de possuir certa resistência, ser autossuportada e ser densa o suficiente para minimizar a erosão. A espessura da chamada camada vegetal deve ser entre 20 cm e 30 cm, com declividade mínima de 3% a 5%.

O Sistema de drenagem de água superficiais deve ser constituído de canaletas em concreto simples moldado “in loco” com caixas de passagens, responsáveis pela coleta das contribuições da área externa ao aterro sanitário, do escoamento superficial da área de projeto, redirecionando o fluxo para minimizar o volume de água que possa chegar ao aterro.

É necessária a realização de poços de monitoramento visando verificar a eficiência dos dispositivos de impermeabilização e qualidade das águas subterrâneas, logo, devem ser implantados no mínimo 4 poços de monitoramento, 1 a montante e 3 a jusante, na

cota mais baixa do terreno, não alinhados no sentido de escoamento das águas subterrâneas, revestidos com diâmetro mínimo de 50 mm.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A temática desse trabalho é muito importante para ampliar a discussão sobre os resíduos sólidos urbanos, seus meios de coleta, tratamento e destinação final, principalmente nos pequenos centros urbanos, onde geralmente se encontram dificuldades financeiras para gestão efetiva dos resíduos sólidos, deixando essa problemática de lado em detrimento a outras atividades, sem levar em conta os danos socioeconômicos acarretados pela má gestão dos resíduos.

Os danos causados pela falta de coleta ou tratamento e destinação final inadequados, atinge diversos seguimentos da sociedade e meio ambiente, a poluição gerada pelos resíduos, contaminam tanto o solo quanto a rede hidrológica da região, tendo como principal responsável o chorume, produto altamente poluente gerada pela biodegradação da matéria orgânica. Infelizmente, lixões acabam por atrair pessoas em vulnerabilidade econômica, que buscam tirar do lixo algum tipo de ganho financeiro e até alimentar, que acabam sendo expostos a diversos tipos de doenças e condições insalubres.

Além dos danos ambientais e sociais, a inadequação na disposição final, é um grande proliferador de doenças, principalmente devido ao aumento de animais próximos aos lixões como ratos, baratas, moscas, escorpiões e mosquitos, dos quais são vetores de incontáveis doenças, tais como, leptospirose, dengue, disenteria, cólera, leishmaniose, entre outras.

O município de Barro segue o perfil de vários outros pequenos municípios, principalmente da região norte-nordeste, onde possuem pequena população urbana, baixa renda per capita, longe de grandes centros urbanos e com carência em infraestrutura. O município apresenta baixos índices de saneamento, principalmente na rede de esgoto onde é precarização é maior tanto na coleta como no tratamento, apesar dos indicadores de água serem melhores, a qualidade da água sofre alterações em sua qualidade devido a grandes secas, que são relativamente comuns na região.

De acordo com a secretaria de infraestrutura do município, os índices de coleta dos resíduos sólidos urbanos são satisfatórios, porém a destinação final ainda é feita no lixão municipal, que acarreta diversos problemas aqui já citados. Vale ressaltar que existe inconsistência nos dados encontrados, pois de acordo com o estudo realizado em 2018, Plano de transição para recuperação da área degradada do lixão de barro (bacia do salgado), o índice de coleta municipal é de apenas 54,37%. Logo, seria de grande importância a Prefeitura Municipal de Barro realizar uma avaliação criteriosa para identificar o real índice de coleta municipal.

O aterro sanitário de pequeno porte, é uma boa solução para a problemática da disposição inadequada de resíduos no município, devido a sua simplicidade de construção e de operação, o aterro sanitário é a melhor alternativa para disposição final de resíduos sólidos, em comparação aos lixões e aterros controlados, pois armazena de forma segura os resíduos, minimizando assim os danos socioambientais causado por eles quando dispostos de forma incorreta.

Levando em consideração que o Consórcio COMARES/UMI, que propõe a criação de um aterro sanitário de grande porte para receber resíduos de diferentes cidades da região do Cariri, sendo localizado em Milagres, do qual o município do Barro faz parte, ainda não tem previsão para ser executado e com a existência de um projeto de recuperação da área onde o atual lixão se encontra, a execução de um aterro sanitário de pequeno porte é uma alternativa viável para a destinação adequada dos resíduos do município, do qual resultaria no fechamento do lixão municipal, fator que é necessário para realização do plano de recuperação da área degradada do lixão, caso a execução do lixão ocorra no prazo de vida útil do aterro sanitário, que equivale a 15 anos, como a execução das valas são feitas constantemente, ele poderia ser desativado sem nenhum tipo de prejuízo.

Devido à falta de estudos necessários para a realização de todas as etapas de elaboração do projeto, foi necessário se trabalhar com um projeto com partes hipotéticas, como no caso da escolha da área, caracterização geotécnica do solo e análise de estabilidade dos taludes, porém, são temas que podem ser escolhidos para estudos futuros e subsequentemente a adaptação do projeto proposto neste trabalho para os padrões dos resultados obtidos destes estudos.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010. **NBR15.849: Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento.**

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997. **NBR13.896: Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação.**

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992. **NBR8419: Apresentação de projetos sanitários de resíduos sólidos urbano.**

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004. **NBR10.004: Resíduos Sólidos – Classificação.**

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2019.** São Paulo: ABRELPE 2019

ATLAS DO DESENVOLVIMENTO HUMANO NO BRASIL. Perfil. Barro, CE. 2013. Disponível em: http://atlasbrasil.org.br/2013/pt/perfil_m/barro_ce#caracterizacao. Acesso em 24 de maio de 2020.

BRASIL. **Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e dá outras providências. 2010.

BORGATTO, A. V. A. **Estudo do efeito fibra e da morfologia na estabilidade de aterros de resíduos sólidos urbanos.** 2006. 174 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

BORGATTO, A. V. A. **Estudo das propriedades geomecânicas de resíduos sólidos urbanos pré-tratados** 2010. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2010

CARVALHO, Anésio Rodrigues de, OLIVEIRA, Mariá Vendramini Castrignano de. **Princípios básicos do saneamento do meio.** São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2003.

CARVALHO, M. F. **Comportamento mecânico de resíduos sólido urbanos.** Tese (Título de Doutor em Geotecnia) - Escola de de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

CEARÁ, Governo do Estado. **Proposta de regionalização para a Gestão Integrada de Resíduos Sólidos no Estado do Ceará.** Tramity. 150 pp. Fortaleza-CE, 2012

CEARÁ. Secretaria de Meio Ambiente – SEMA. **Plano de Recuperação das Áreas Degradadas (PRAD) de 81 Lixões a Céu Aberto nos Municípios das Bacias Hidrográficas do Acaraú, Metropolitana e Salgado, no Estado do Ceará: Lixão de Barro.** Barro-CE. 2018a. 142p.

CEARÁ. Secretaria de Meio Ambiente – SEMA. Plano regional de gestão integrada de resíduos sólidos: Região Cariri. 2018b. 113p.

ELK, A. G.H.P. Redução de emissões na disposição final. 40p. Rio de Janeiro. IBAM, 2007.

FUNCEME (2020). Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Índice de Aridez para o Ceará. Disponível em: http://www.funceme.br/?page_id=2783
Acesso em: janeiro/2020.

GOUVEIA, Nelson. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciência & Saúde Coletiva**, vol. 17, no. 6, p. 1503–1510, 2012.

GÜNTHER, Wanda R. **Características dos Resíduos Sólidos Urbanos**. 2016. 30 slides. IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - PNSB**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/multidominio/meio-ambiente/9073-pesquisa-nacional-de-saneamento-basico.html?=&t=publicacoes>. Acesso em: 17 mar. 2020.

HYPEVERDE. **Diferenças entre Lixão, Aterro Controlado e Aterro Sanitário**. Disponível em: <https://www.hypeverde.com.br/diferencas-entre-lixao-aterro-controlado-e-aterro-sanitario/>. Acesso em: 17 mar. 2020.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ – IPECE. Secretaria do Planejamento e Gestão. **Perfil Municipal 2009**. Barro. 2009.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ – IPECE. Secretaria do Planejamento e Gestão. **Perfil Municipal 2017**. Barro. 2017.

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.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Resíduos Sólidos**. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos.html>. Acesso em: 17 mar. 2020.

MOTTA, E. Q. **Avaliação da Resistência ao Cisalhamento de Resíduos Sólidos Urbanos com Codisposição de Lodo de Tratamento de Esgoto através de Ensaios de Cisalhamento Direto de Grandes Dimensões**. 2010. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, 2010.

NASCIMENTO, J.C.F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

OBLADEN, N. L. et al. **Guia Para Elaboração de Projetos de Aterros Sanitários para Resíduos Sólidos Urbanos**. Vol II. Curitiba: Habitat Ecológico Ltda, 2009.

PADILLA, R. S. **Aplicação de um modelo computacional tridimensional para estimativa de balanço hídrico em aterros sanitários**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia da UFMG,

Universidade de Minas gérias, Belo Horizonte, 2007.

PIMENTEL, V. E. **Avaliação da resistência ao cisalhamento em GCLs: Uma nova metodologia de ensaio**. 2008. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

REDE NACIONAL DE CAPACITAÇÃO E EXTENSÃO TECNOLÓGICA EM SANEAMENTO AMBIENTAL (ReCESA). **Resíduos sólidos: projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários: guia profissional em treinamento: Nível 2** / Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.) - Belo Horizonte: ReCESA, 2008. 120 p

REMÉDIO, F. H. **Análise de estabilidade de taludes de aterro de resíduos urbanos utilizando parâmetros geotécnicos de propostas bibliográficas e correlações com N_{SPT}** . Dissertação de mestrado – Universidade Estadual Paulista/Sp, 2014

SANTOS, A. F. M. S. (2003), **Caracterização, avaliação da biodegradabilidade aeróbia e anaeróbia e tratamento em Reator UASB do Chorume do aterro da Muribeca**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Pernambuco/PE, 2003.

SANTOS, N.R. et al. **Estudo da geração per capita de resíduos urbanos na zona sul do estado do Rio Grande do Sul**. In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE. Anais elet 2018, Gramado. Disponível em: <<https://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2018/IV-054.pdf>> Acesso em: 29 abr. 2020.

SILVA, R. A. C. da. **Avaliação da evolução do comportamento geotécnico de aterros sanitários com base na realização de ensaios de laboratórios e de campo**. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Ceará, 2017.

SOUZA, K.R.; KERBAUY, M.T.M. Abordagem quanti-qualitativa: superação da dicotomia quantitativa-qualitativa na pesquisa em educação. In: **Educação e Filosofia**. Uberlândia, v. 31, n. 61, p. 21-44, jan./abr. 2017. ISSN 0102-680.

VINA. **Fim dos lixões no país. Será?** Disponível em: <<https://vinaec.com.br/2014/08/fim-dos-lixoes-no-pais-sera/>>. Acesso em: 17 mar. 2020.