

Estudos Geográficos

Revista Eletrônica de Geografia

Avaliação das condicionantes de segurança em uma célula de aterro sanitário operacional no sul da Bahia

Cleverson Alves de Lima¹  

Clara Campos dos Santos²  

Ana Olivia Pinheiro Silva³  

Resumo: O aumento na geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) está diretamente ligado ao crescimento populacional, desenvolvimento econômico e social de uma localidade. Com isso, os aterros sanitários exercem uma função importantíssima, possibilitando uma destinação para esses resíduos de forma sustentável e menos agressiva ao ambiente. Entretanto, é preciso se atentar aos cuidados dispensados a esses resíduos, desde a sua disposição no aterro sanitário até o seu processo de confinamento, como é destacando na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a qual estabelece diretrizes para o gerenciamento, incluindo critérios operacionais e de monitoramento. Neste contexto, o estudo busca avaliar as condições de segurança em uma célula de aterro sanitário em operação no Sul da Bahia, de acordo com a legislação ambiental e as normas técnicas pertinentes. A pesquisa utilizou os parâmetros geotécnicos do solo e do resíduo, o projeto geométrico da célula do aterro sanitário e as condições climáticas regionais para o desenvolvimento de um modelo numérico de estabilidade e de um sistema de confinamento. Para isso, foi necessário levantar os parâmetros hidrológicos, gravimétricos e de produção de resíduo para a avaliação da segurança estrutural das células do aterro sanitário. Os resultados evidenciaram a qualidade do projeto, identificando algumas deficiências e propondo melhorias no sistema de segurança, tendo em vista a redução da produção de lixiviados e o aumento da estabilidade do maciço.

Palavras-chave: Gestão de Resíduos; Proteção ambiental; Resíduos Sólidos Urbanos.

¹ Docente, Departamento de Engenharia e Computação, Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC)

² Engenheira Civil, Departamento de Engenharia e Computação, Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC)

³ Engenheira Civil, Departamento de Engenharia e Computação, Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC)



Este artigo está licenciado com uma licença Creative Commons

SAFETY CONDITIONS EVALUATION IN AN OPERATIONAL SANITARY LANDFILL CELL IN SOUTH BAHIA

Abstract: The increase in the generation of Urban Solid Waste (MSW) is directly linked to population growth and the economic and social development of a location. Therefore, landfills play a very important role, enabling a sustainable and less harmful disposal of this waste. However, it is necessary to pay attention to the treatment that is being given to this waste, from its disposal in the landfill to its confinement process, as highlighted in the National Solid Waste Policy (PNRS), which establishes guidelines for management, including operational and monitoring criteria. In this context, the study seeks to evaluate the safety conditions in a landfill cell in operation, in accordance with environmental legislation and relevant technical standards. The research used the geotechnical parameters of the soil and waste, the landfill geometric design and the regional climate conditions to develop a numerical stability model and a confinement system. To this end, it was necessary to survey the hydrological, gravimetric and waste production parameters to assess the landfill cells structural safety. The results demonstrated the project quality, identifying some safety system deficiencies and proposing improvements, with a view to reducing leachate production and increasing the landfill stability.

Keywords: Waste Management; Environmental Protection; Urban Solid Waste.

EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE SEGURIDAD EN UNA CELDA OPERATIVA DE UN VERTEDERO EN EL SUR DE BAHÍA

Resumen: El aumento en la generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) está directamente relacionado con el crecimiento poblacional, el desarrollo económico y social de una localidad. Por ello, los vertederos desempeñan un papel muy importante, ya que permiten eliminar los residuos de forma sostenible y respetuosa con el medio ambiente. Sin embargo, es necesario prestar atención al cuidado que se le da a estos residuos, desde su disposición en el vertedero hasta su proceso de confinamiento, como lo destaca la Política Nacional de Residuos Sólidos (PNRS), que establece lineamientos para su gestión, incluyendo criterios operativos y de monitoreo. En este contexto, el estudio busca evaluar las condiciones de seguridad en una celda de vertedero que opera en el Sur de Bahía, de acuerdo con la legislación ambiental y las normas técnicas pertinentes. La investigación utilizó los parámetros geotécnicos del suelo y los residuos, el diseño geométrico de la celda del vertedero y las condiciones climáticas regionales para desarrollar un modelo de estabilidad numérica y un sistema de confinamiento. Para lograrlo, fue necesario estudiar los parámetros hidrológicos, gravimétricos y de producción de residuos para evaluar la seguridad estructural de las celdas del vertedero. Los resultados pusieron de relieve la calidad del proyecto, identificando algunas deficiencias y proponiendo mejoras en el sistema de seguridad, con vistas a reducir la producción de lixiviados y aumentar la estabilidad del macizo.

Palabras clave: Gestión de Residuos; Protección ambiental; Residuos Sólidos Urbanos.

INTRODUÇÃO

As transformações promovidas pela sociedade industrial e de consumo, acompanhada pelo crescimento populacional e a concentração urbana, pressiona o ambiente com a geração de resíduos sólidos das mais variadas naturezas, acarretando em um processo de degradação ambiental e influenciando na qualidade

de vida do ser humano (ROTH & GARCIAS, 2008). Com isto, a temática dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) ganha destaque e impõe desafios para as cidades que buscam um desenvolvimento ambientalmente sustentável.

Surge então a necessidade de se dispor e tratar estes resíduos de forma adequada e estruturalmente segura. Segundo Spinola et al. (2017) e Lopes e Silva (2020), no Brasil predomina o uso dos aterros sanitários como forma adequada e de baixo custo para centralização e tratamento definitivo dos resíduos, dada a possibilidade de proteger a saúde pública, controle dos impactos ambientais, controle de odores e vetores nas proximidades dos centros urbanos. A viabilidade da aplicação desta técnica se dá pelos critérios ambientais e de segurança, além dos baixos custos para investimento inicial e operação ao longo da vida útil do aterro sanitário (AS), podendo ainda, ter sistemas associados para valoração dos resíduos como a reciclagem, compostagem e cogeração, tornando este tratamento mais eficiente do que a simples disposição em lixões ou a mera incineração.

No entanto, para a formação da estrutura celular de um aterro sanitário, é necessário dimensionar um sistema de proteção que garanta a estanqueidade e segurança contra movimentos de massa e outras contaminações da água, solo e ar. Para isto, segundo Oliveira & Braga (2017) e Silva & Tagliaferro (2021), deve-se especificar os materiais e espessuras para a cobertura das células, podendo ser de materiais sintéticos ou terrosos, com vegetação ou mistas, cuja finalidade é proteger o núcleo da célula contra a entrada das águas pluviais e que conduzam as águas superficiais para um local de descarte sem perda de material por erosão, evitando ou reduzindo a produção de lixiviados. Este sistema funciona de maneira associada com o sistema de proteção do subsolo e das águas subterrânea, tornando a base da célula impermeável e evitando a contaminação do lençol freático.

Já as propriedades dos resíduos sólidos urbanos como o dimensionamento do tamanho, quantidade de matéria orgânica, potencial gerador de biogás e outras, são de difícil quantificação absoluta por serem considerados produtos heterogêneos, os quais variam de acordo com a localidade de coleta e com o tempo de degradação dos mesmos. Neste caso, durante o estudo de implantação dos aterros verifica-se o perfil de RSU gerado pelos municípios da área de influência deste aterro para se obter uma aproximação da densidade média do produto lançado na célula (Ferreira et al., 2019). Além disso, não há uma padronização dos procedimentos para este tipo de material, ou seja, a gestão de RSU, independente da maneira que o mesmo

será disposto, é um trabalho que demanda estudo prévio dos componentes e de diversas técnicas que podem ser utilizadas para a realização de uma disposição adequada (Protasio, 2013).

Sendo assim, neste trabalho foram avaliadas as condicionantes de segurança para a condição crítica da célula de um aterro sanitário operacional por meio de simulações numéricas de estabilidade dos taludes e de percolação das águas pluviais, variando a composição do material aplicado no sistema de cobertura terroso, a presença da vegetação e a camada de armazenamento. Os cenários foram montados a partir da geometria final do projeto, das propriedades dos materiais e do perfil dos RSU encaminhados para esta unidade de tratamento (UT), obtidos por ensaios laboratoriais contratados pela gestora do aterro sanitário. Optou-se pela análise da geometria final por se tratar da condição crítica de massa total, volumetria, altura e área de captação das águas pluviais. Estas análises são importantes para se avaliar o comportamento crítico do sistema de cobertura e identificar pontos que podem ser melhorados para aumento do desempenho e segurança.

O Problema dos Resíduos no Contexto Urbano

Segundo Godeke et al. (2013) e Marinho & Camargo (2023), a preocupação com o meio ambiente conquistou espaço a partir dos anos 1970 com o ambientalismo público e a “ambientalização” do setor privado, que ganhou tónus na década de 1980 com o consumo sustentável, com a implementação de políticas públicas de encerramento dos lixões e fomento a adoção de aterros sanitários pelo país. Neste período, foram implementados programas de educação e consciência ambiental, reciclagem, a necessidade de redução do descarte e a logística reversa para toda a cadeia de consumo. Além disso, segundo Pereira & Souza (2017) e Sodré et al. (2020), foram criadas políticas específicas e planos para o setor como forma de se reduzir os impactos ambientais e organizar os sistemas de tratamento de resíduos nos municípios brasileiros. Porém, mesmo com tais estímulos a redução da geração, organização da coleta, disposição sustentável e reaproveitamento dos recicláveis, estes vêm sendo implementados de maneira desarticulada, tendo pouca efetividade na questão de controle do RSU.

Segundo Silva et al. (2024), um dos problemas do descarte de resíduos sólidos em aterros é a falta de uma coleta seletiva, má destinação para

reaproveitamento, falta de estrutura para receber resíduos simples e destinação incorreta de resíduos de classe diferente das dispostas em aterro sanitário.

Tal situação traz uma reflexão a respeito da administração dos resíduos gerados diariamente, que demanda uma abordagem analítica completa desde a sua geração até a sua disposição. Diversos autores citam a relação entre desenvolvimento econômico individual e geração de resíduos é direta, ou seja, o aumento do poder aquisitivo somado ao aumento da população e o crescente consumo de materiais descartáveis, contribuem para o problema da acentuada geração de RSU e estes estão relacionados a renda da população e o grau de desenvolvimento das cidades. (Dias, 2012; Bosquilha & Martirani, 2019; Menezes et al., 2019; Berguenmayer et al., 2020; Bayer et al., 2022). Na abordagem dos autores, as regiões com maiores rendas domiciliares geram as menores porcentagens de resíduos recicláveis, enquanto as menores rendas geram maiores porcentagens de secos.

Diante desse quadro e da necessidade de se resolver o problema da disposição do RSU, além do arcabouço legal, foi elaborada a norma NBR 8419/1992 com procedimentos e critérios técnicos para o manejo dos resíduos que considerassem aspectos de segurança operacional, social e ambiental; posteriormente complementada pela NBR 13896/1997, que da classificação dos materiais possíveis de serem dispostos nos aterros para resíduos não perigosos; e da NBR 15849/2010, que trata dos critérios de localização, implantação e operação de aterros sanitários.

Processo de Disposição de RSU

Fernandes (2019) define o aterro sanitário como uma obra de engenharia destinada a receber o RSU de forma adequada e segura, organizada por uma série de sistemas de monitoramento e proteção. Enquanto que Júnior (2021) indica que a escolha pelos aterros sanitários no contexto brasileiro é respaldada tanto por considerações técnicas quanto a viabilidade econômica. Estes elementos são assegurados pelos materiais e características construtivas do aterro sanitário, que, segundo Pardinho & Santos (2021), um projeto bem elaborado permite a minimização dos efeitos socioambientais, e a depender dos volumes depositados, pode gerar outros créditos financeiros pelo reuso dos subprodutos da decomposição

do RSU. Ou seja, a elaboração do projeto demanda estudos e dimensionamento de sistemas de impermeabilização que mantenham o RSU isolado da interface resíduo-substrato-atmosfera, por meio de sistemas de drenagem superficial, coleta e tratamento de percolados, sistemas de condução de gases, compactação dos resíduos e da garantia da estanqueidade da célula coberta por materiais inertes.

Para Dall’Agnol et al. (2019), estes procedimentos preliminares só foram possíveis a partir da promulgação da lei 12.305/2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos, onde foram estabelecidas diretrizes para a gestão, e impulsionado a realização de estudos e concepção de projetos para implantação de aterros sanitários dada a necessidade de se eliminar os lixões nos municípios e se adotar medidas adequadas para disposição e tratamento.

Com isto, este marco regulatório estabelecido pela lei, estabeleceu o conjunto de princípios, objetivos e instrumentos para a efetivação dessa gestão no território nacional, ao relacionar uma maior participação social e incentivar a articulação das esferas do governo com o setor privado e sociedade civil por meio de comitês e outros espaços públicos nas discussões sobre o tratamento dos resíduos e efluentes gerados (Santiago et al., 2023).

Critérios de Segurança para Projeto

Para a determinação da localização e geometria de um aterro sanitário, deve-se conhecer as condicionantes físico-ambientais, geotécnicas, hidrológicas e de produção per capita de RSU para a região de interesse. A NBR 13.896/1997 trás critérios e fatores que devem ser observados para o desenvolvimento de um projeto, tais como: a proximidade de recursos hídricos, profundidade do lençol freático, vegetação local, acessos, área disponível, vida útil de projeto e a distância mínima dos núcleos urbanos.

É crucial destacar que a crescente demanda por áreas destinadas à disposição de resíduos, aliada à escassez de locais adequados próximos aos centros geradores, exige uma otimização da capacidade de disposição dos locais disponíveis. Alguns autores discutem sobre os cuidados e técnicas adicionais antecipando problemas e prevendo o reuso do espaço após o término da vida útil do aterro, mencionando a necessidade do monitoramento contínuo da estabilidade do maciço durante a decomposição dos materiais, dos recalques e deslocamentos

verticais e da taxa de produção de fluidos. A ausência de monitoramento desses deslocamentos aumenta o risco de ruptura dos taludes, resultando em potenciais impactos ambientais (Benvenuto et al., 2009; Gomes, 2009; Benvenuto, 2011; Spínola, 2017; Iunes, 2020).

Desta forma, diversas pesquisas enfatizam a importância de um projeto bem delimitado para o aterro, bem como um sistema de proteção para as células do aterro sanitário. Estes sistemas constituem em elementos de projeto que garantam a estanqueidade e estabilidade de uma estrutura terrosa mista, constituída por material terroso e resíduos sólidos, dispostos em multicamadas que reduzam a passagem das águas pluviais para o interior do maciço, conduzam as águas superficiais para fora do sistema por meio de seu sistema de drenagem, impeçam que os lixiviados cheguem até o terreno natural, e, também garantam a estabilidade estrutural do maciço evitando que o mesmo sofra movimentos de massa indesejados (Carvalho, 1999; Marques, 2001; Giorgini et al., 2021; Freitas & Júnior, 2022; Nascimento, 2022; Ribeiro et al., 2023).

Segundo Costa (2015), existem diferentes configurações de camadas de cobertura, listadas na literatura especializada, sendo: cobertura convencional, que utiliza solos de baixa condutividade, coberturas evapotranspirativas, baseados no uso de componentes do balanço hídrico de um aterro, e camadas oxidativas, onde se utilizam materiais que condicionem o desenvolvimento de microrganismos consumidores de metano. Já para Costa (2018) e Oliveira et al. (2018), o desempenho de um aterro de resíduo sólido está diretamente vinculado ao seu sistema de proteção eficiente e duradouro - considerando sua espessura, grau de compactação, presença de vegetação e camada de armazenamento/liberação - tornando a busca por materiais que garantam um bom desempenho, com custos controlados e com baixo impacto ambiental.

MATERIAIS E MÉTODOS

Contexto dos Resíduos no Sul da Bahia

O aterro sanitário em análise está localizado no sul da Bahia, na microrregião de Itabuna-Ilhéus, com concentração habitacional da ordem de 400.000 habitantes, constituindo assim, segundo a Conder (2020), como um dos pólos urbano-regionais mais importantes do estado. Os municípios citados possuem pesquisas de

caracterização dos resíduos sólidos urbanos, que apesar de serem boas referências, são desatualizadas frente ao novo ciclo de crescimento vivenciado nesta última década (Spinola, 2014). Estes estudos, na época, foram realizados pelo Conder a fim de integrar o Plano Diretor de Limpeza Pública e avaliar a necessidade de estruturar o sistema de disposição de resíduos, antes destinados ao Aterro do Itariri (Ilhéus), Lixão do Cururupe (Ilhéus) e Volta da Cobra (Itabuna). A pesquisa realizada trouxe dados da produção de resíduos conforme a classe e renda familiar, com índice médio de 0,52 kg/hab/dia, conforme pode-se ver na Tabela 1.

Tabela 1 – Geração de Resíduos Sólidos Urbanos

| Classes | Renda (SM) | Per capita (kg/hab/dia) | | Per capita média (kg/hab/dia) | | Peso específico médio por classe (kg/m ³) | | Média Geral (kg/m ³) | |
|---------|------------|-------------------------|------|-------------------------------|------|---|--------|----------------------------------|--------|
| | | Maio | Fev. | Maio | Fev. | Maio | Fev. | Maio | Fev. |
| A | > 10 | 0,82 | 0,82 | | | 116,83 | 110,82 | | |
| B | 05 a 10 | 0,77 | 0,63 | | | 88,36 | 115,92 | | |
| C | 02 a 05 | 0,68 | 0,57 | 0,52 | 0,53 | 103,67 | 134,11 | 132,82 | 130,93 |
| D | 01 a 02 | 0,54 | 0,50 | | | 124,50 | 121,23 | | |
| E | <01 | 0,50 | 0,50 | | | 137,70 | 136,09 | | |

CONDER/FEP (2020)

Os dados revelaram que a quantidade de resíduos sólidos produzida varia conforme a classe ou renda familiar, isto é, observou-se que quanto maior a renda ou classe, maior a produção de resíduos sólidos, assim, se destaca a classe A com o maior índice (0,82 Kg/hab/dia) em ambas as estações do ano, seguida da classe B, com uma produção em maio de 0,77 Kg/hab/dia e, em fevereiro 0,63 Kg/hab/dia. Já a classe E, com a menor renda entre as classes, apresentou o menor índice de geração de RSU (0,50) Kg/hab/dia (CONDER/FEP, 2020). Ou seja, dentre as variáveis externas mais importantes que impactam na produção dos RSU, o crescimento econômico regional e a taxa de crescimento populacional são as que se destacam.

Caracterização da Área de Estudo

O projeto do aterro em estudo considerou um volume recebido de 500 ton/dia em resíduos. Com este cálculo, a empresa dimensionou a geometria máxima do aterro (Tistu, 2022; Geotech, 2023). A perspectiva de vida útil da UT foi estimada até 2052, podendo variar de acordo com o número de municípios associados que

enviem seus resíduos sólidos ou a variação econômica e populacional da região. Considerando o panorama regional com a implantação de projetos estruturantes, tais como o Porto Sul, unidade petroquímica, mineroduto, duplicação da BR 415, novo aeroporto internacional entre outros, há uma expectativa de aumento do PIB nominal das cidades, e com isso, alterar o padrão de consumo urbano.

No entanto, estas variações não impactarão na geometria final do aterro sanitário em questão que tem cota e volumetria definidos em projeto, reduzindo apenas o período de vida útil devido a capacidade licenciada, que, segundo Faria et al. (2022), está em 3.314.734 toneladas durante sua vida útil.

Então, em 2020, deu-se início às operações com alguns municípios e empresas da região conveniados em face às exigências legais e a falta de solução para o problema da disposição correta dos resíduos. O aterro sanitário é privado, tem caráter regional, e está localizado entre as duas maiores cidades da região, atuando diretamente na guarda e gerenciamento do RSU e tratamento dos seus efluentes (Figura 1).

Figura 1 – Imagem aérea do aterro privado regional



Fonte: TISTU, 2022

Segundo o relatório operacional (TISTU, 2022), o aterro sanitário recebe diariamente cerca de 250 toneladas de resíduos sólidos urbanos provenientes dos municípios da região e setor privado, todavia possui previsão de ampliação da sua capacidade de recebimento, bem como a expansão do projeto original. O relatório operacional aponta os resultados amostrais da gravimetria do RSU recebido no

aterro, onde foram aplicados os procedimentos descritos na NBR 10.007/2004, cujos valores estão na Tabela 2.

Tabela 2 – Média gravimetria de duas amostras enviadas para o aterro

| | Amostra 1 | Amostra 2 | Brasil |
|--------------------------|------------------|------------------|---------------|
| Contaminante - Biológico | 15,12% | 18,21% | 0,00% |
| Contaminante - Químico | 0,00% | 1,20% | 0,00% |
| Espumas | 0,41% | 0,00% | 0,00% |
| Madeira | 0,48% | 0,57% | 0,00% |
| Tecido/Couro | 12,03% | 0,00% | 5,60% |
| Isopor | 1,88% | 0,10% | 0,00% |
| Metal | 0,60% | 1,42% | 2,30% |
| Compósitos | 1,13% | 5,15% | 0,00% |
| Plásticos | 11,65% | 14,43% | 16,80% |
| Vidros | 3,38% | 0,25% | 2,70% |
| Papel/Papelão | 8,65% | 11,68% | 10,40% |
| Matéria Orgânica | 23,68% | 23,02% | 45,30% |
| Rejeitos | 19,92% | 20,27% | 14,10% |
| RSS | 1,07% | 1,51% | 1,40% |
| Borracha | 0,00% | 1,37% | 0,00% |
| Alumínio | 0,00% | 0,82% | 0,00% |
| Embalagens | 0,00% | 0,00% | 1,40% |

Fonte: Tistu (2022), Abrelpe (2020)

A UT está localizada na Rod. Jorge Amado, BR 415, Km 21, no município de Ilhéus (BA) - Lat. -14.7815935, Long. -39.2231271. A empresa selecionou esta área por atender todas as condicionantes normativas, legais e ambientais, além de atender estrategicamente os dois maiores pólos geradores de RSU da região sul da Bahia. A poligonal do aterro, bem como o plano de alteamento e disposição dos RSU estão indicados na Figura 2.

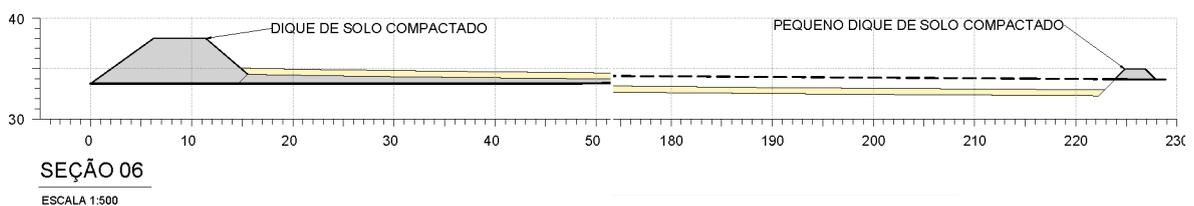
Figura 2 – Poligonal e plano de ocupação do aterro sanitário



Fonte: GeoTech (2023).

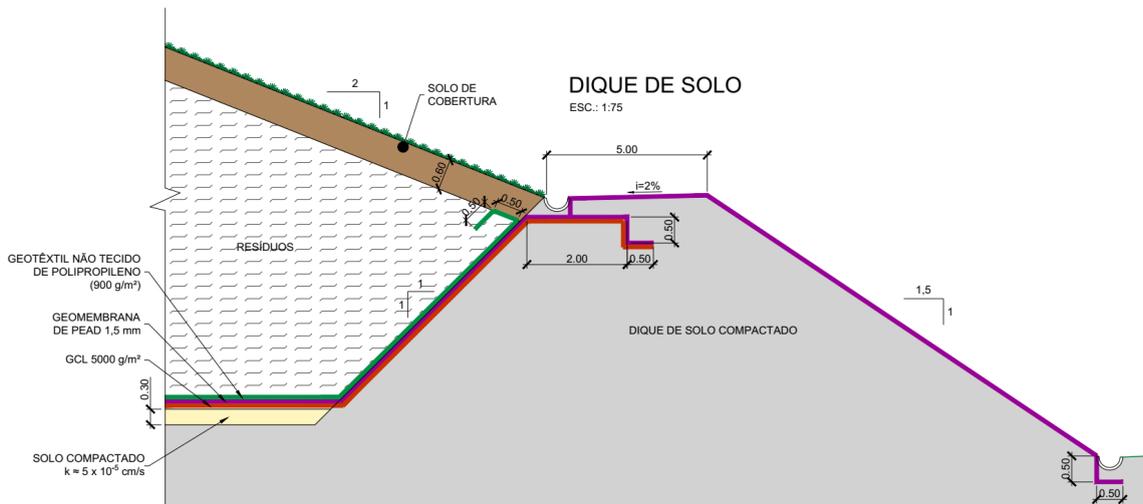
A mobilização das células ao longo da vida útil será feita em fases até o limite de sua estabilidade. Na proposta original contida no projeto, há previsão para 05 níveis a partir do nível natural, variando da cota 32,41 a 58,00 m, conforme apresentado na Figura 2. O sistema de preenchimento das células será linear, sem seções, com diques de contenção nas extremidades para confinamento e preparação das células para o alteamento (Figura 3). Enquanto o sistema de cobertura previsto é com solo natural compactado nos primeiros níveis e solo natural com cobertura em gramínea na camada do nível final, conforme Figura 4 (a), (b) e (c).

Figura 3 – Seções do projeto original



Fonte: CVR (2023)

Figura 4 – (a) Detalhe da camada de cobertura; (b) execução da impermeabilização de fundo; (c) cobertura dos níveis com solo natural.

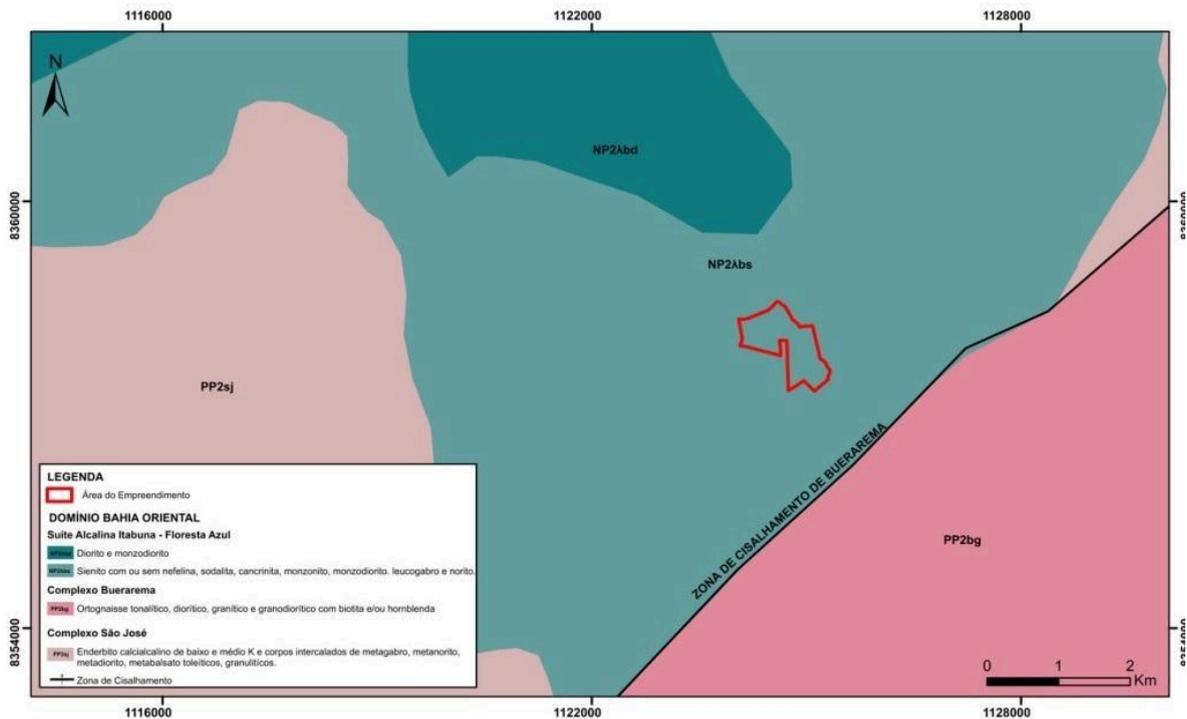


Fonte: CVR (2023)

Parâmetros Geotécnicos e Ambientais

Segundo Geotech (2023), as prospecções realizadas no terreno da UT predominam latossolo vermelho-amarelo, com baixa permeabilidade, tipicamente argiloso e com horizontes bem desenvolvidos. Foi identificado também a presença de solos distróficos, com presença de argila 1:1, ou seja, com baixo índice de expansão. A geologia regional é baseada na carta geológica regional está inserida no domínio Coaraci-Itabuna, formado por rochas intrusivas do Rio Paraíso, granitos e monzonitos; pelo complexo São José, predominando o tonalito; e do complexo Ibicaraí-Buerarema, com rochas gnáissicas; segundo a carta SD.24-Y-B (Neves & Souza, 1984; Souza et al., 2014; CBPM, 2024). Na poligonal do aterro, as sondagens evidenciaram afloramentos do Grupo Barreiras, com arenitos e conglomerados intercalados com silitos e argilitos, apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Geologia da área de interesse com destaque para a poligonal



Fonte: adaptado da CPRM (2003)

Na área de estudo foram realizadas sondagens a percussão para simples reconhecimento (SPT), apresentado na Figura 6, que evidenciou um perfil pedológico e geotécnico regular, organizado em: alteração de rocha com silte argiloso rijo e presença de areia fina variando entre -2,15 e -2,70 m de profundidade, que foi também a cota impenetrável, sem a presença de água. Em outra prospecção SPT, foi identificado o mesmo perfil pedológico e geotécnico, porém com impenetrável com cota -1,15 m, sem a presença de água. Em sondagem rotativa contínua, que transpôs a formação rochosa Barreiras, foi encontrada zona com argila rija e pedregulhos, com baixa permeabilidade, e nível d'água (NA) encontrado na cota -41,73 m, após 24 h de observação do poço aberto. Este aspecto é importante por ser uma condicionante exigida da NBR 13.896/1997 para cotas de NA, que para implantação de aterros sanitários devem ficar abaixo de -1,50 m abaixo da célula, ou seja, as sondagens indicam que a área está apta e dentro dos parâmetros normativos e ambientais.

Sobre os resíduos sólidos encaminhados, foram aplicados os procedimentos de amostragem conforme NBR 10.007/2004 para a obtenção do peso específico característico do RSU que seria depositado. Obteve-se um peso específico da ordem de 975,47 kg/m³ ou 9,65 kN/m³; enquanto que o resultado da análise dos lixiviados e contaminantes químicos contidos por estes resíduos, ficaram abaixo dos

Limites de Atterberg

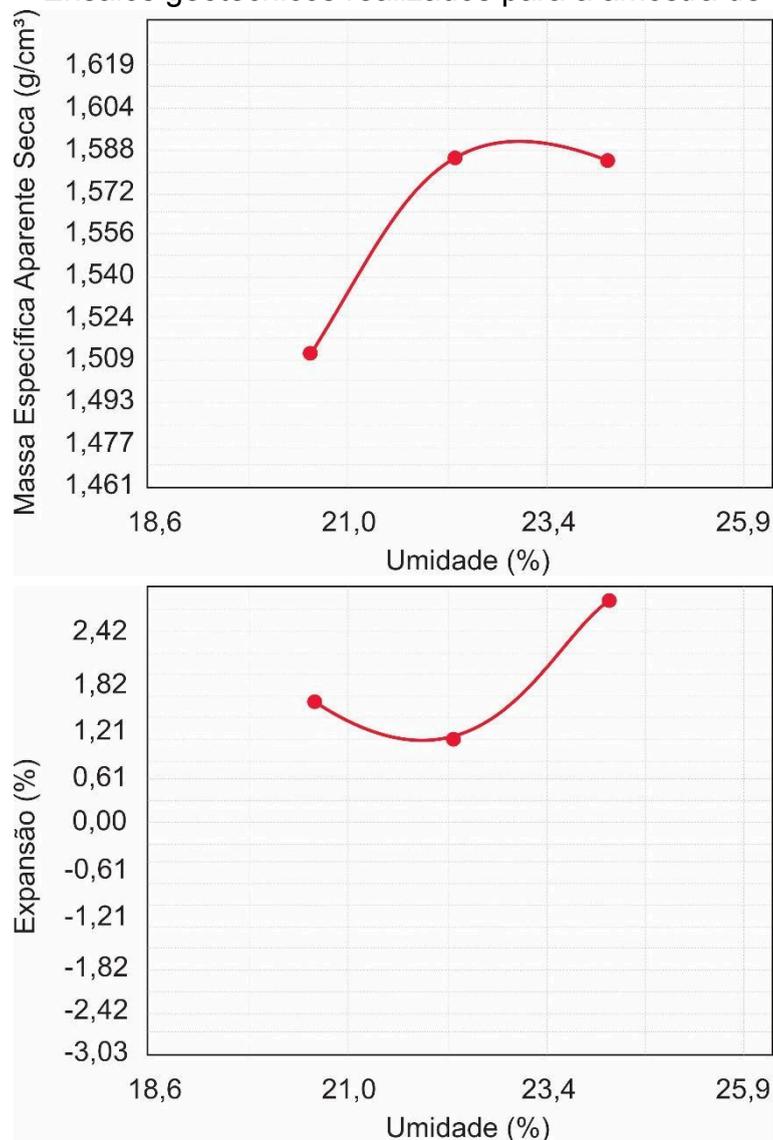
| | |
|-----------|------|
| LL (máx.) | 54% |
| LP (máx.) | 27 % |
| IP (máx.) | 27% |

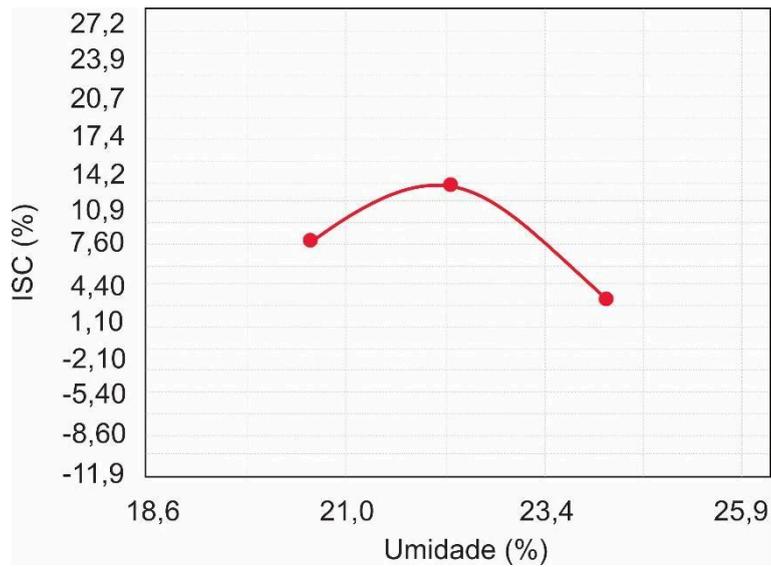
Permeabilidade

| | |
|----------------------------|-------------------------------------|
| K (T=20° C) | $1,418 \times 10^{-6} \text{ cm/2}$ |
| Teor de umidade (moldagem) | 23,3 % |

Os resultados gráficos são apresentados na Figura 7 (a, b e c) e Figura 8 (a, b e c).

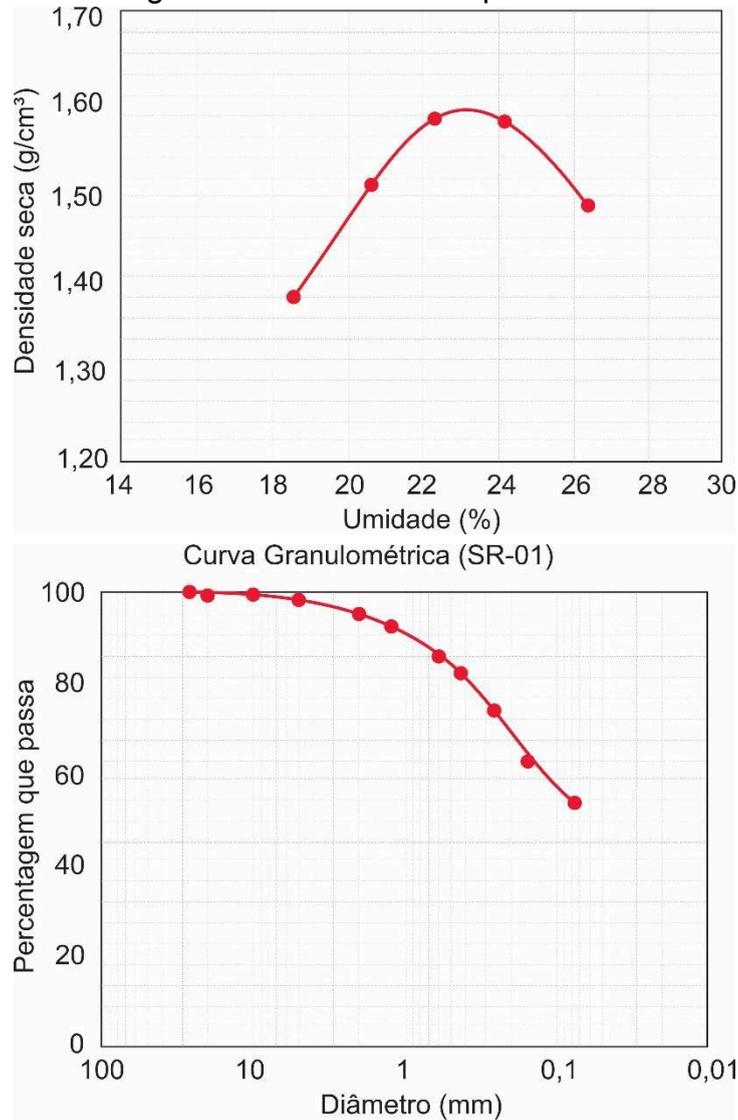
Figura 7 – Ensaios geotécnicos realizados para a amostra de solo local

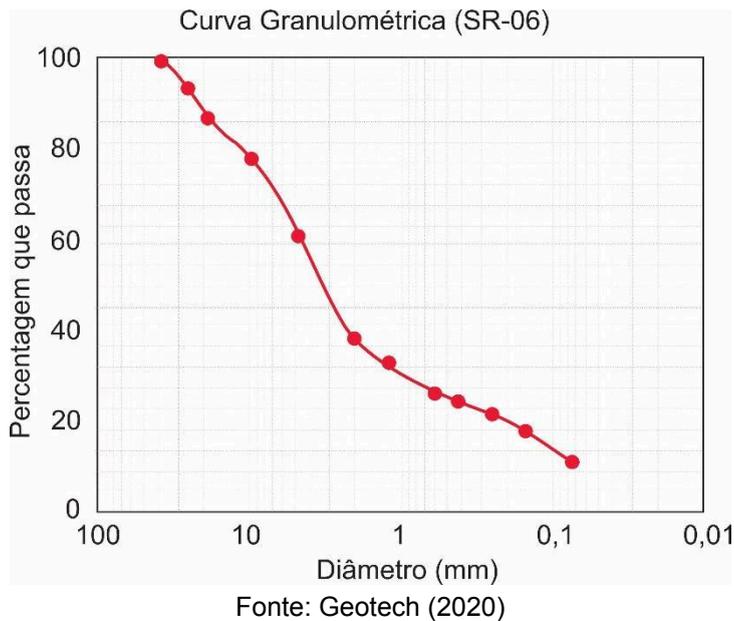




Fonte: Geotech (2020)

Figura 8 – Ensaios geotécnicos realizados para a amostra de solo local





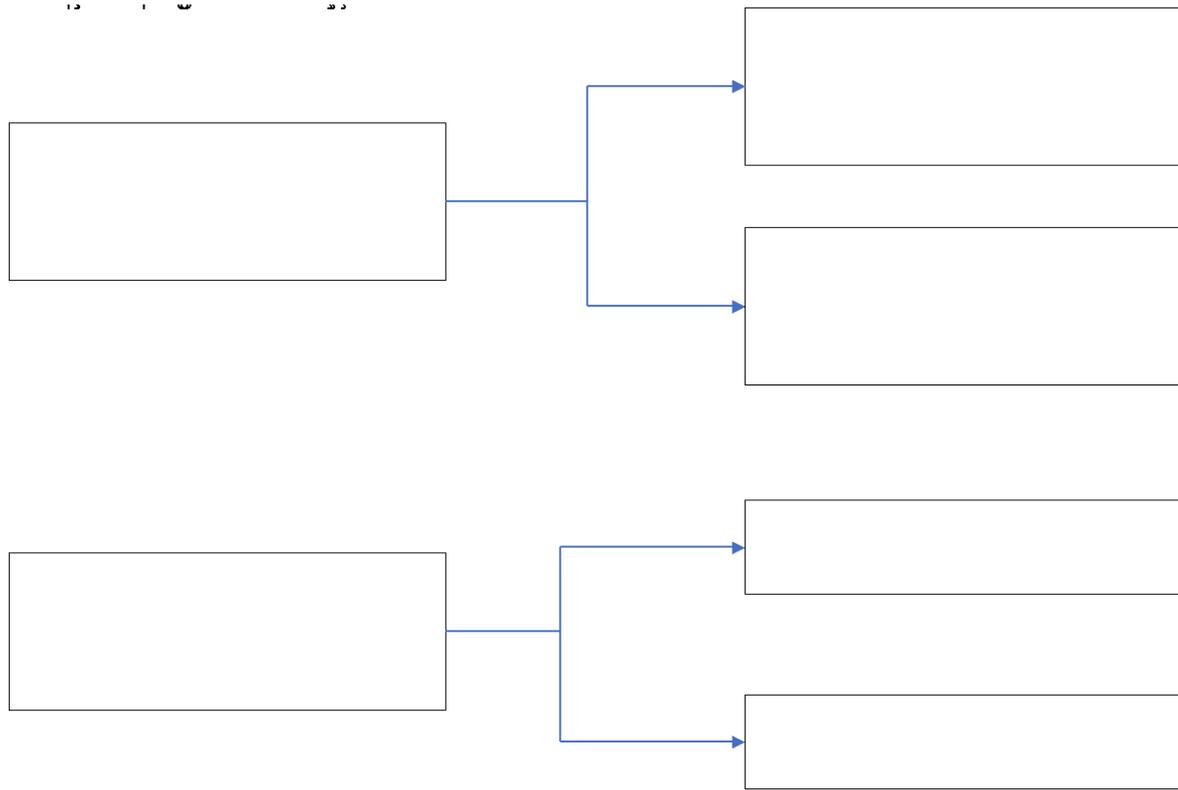
Procedimento de Análise

Os estudos partiram pelo levantamento cadastral e da revisão dos relatórios de resíduos encaminhados para o aterro; também foi realizada uma revisão bibliográfica sobre as condicionantes e métodos de segurança operacional para a UT-RSU. Para isto, foram consultados manuais e relatórios técnicos fornecidos pela gestora do aterro sanitário, que forneceram os parâmetros geotécnicos e locais do empreendimento.

O mapa locacional da planta do aterro sanitário foi utilizado para identificar a posição crítica do maciço para avaliação da estabilidade do talude e do fluxo de água e vapor na zona vadosa, no momento que atingir a cota, geometria e volumetria finais. Busca-se com isso avaliar as condições de segurança do aterro sanitário considerando as condicionantes climáticas e de engenharia, tais como: (i) os parâmetros geométricos das camadas heterogêneas de solo e resíduo, na verificação do Fator de Segurança (FS) do talude quanto a suscetibilidade ao movimento de massa, utilizando para isto o software Geostudio Slope/W; (ii) bem como as condições de estanqueidade das células e o percentual de fluidos que passam pelo sistema de cobertura, por meio do software Geostudio Vadose/W.

As simulações foram realizadas em cenários que avaliavam diversos arranjos possíveis para o sistema de cobertura e segurança da célula do aterro sanitário, seguindo o fluxo esquemático da Figura 9.

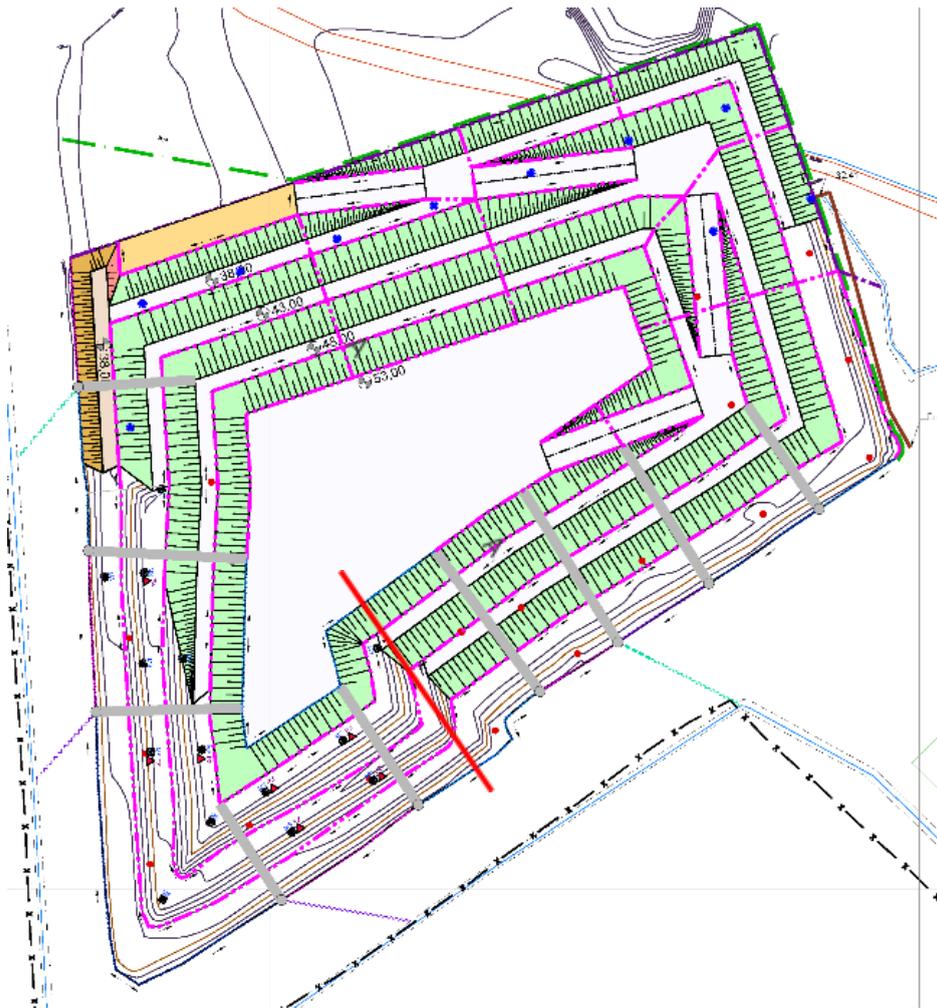
Figura 9 - Cenários de análise propostos para a célula de aterro



Fonte: Autores

Desta forma, os procedimentos adotados para avaliação do fluxo no maciço consideraram o estado da arte quanto aos critérios e condicionantes aplicadas à célula da UT (Borba, 2018; Borba, 2019; Helene, 2019; Borba, 2020; Iunes, 2020). Enquanto os procedimentos avaliativos para estabilidade foram aplicados em uma seção crítica A-A do maciço indicada na Figura 10, alinhando-se com as melhores práticas da engenharia (Andrades, 2018; Daciolo, 2020; Araújo Neto, 2021; Norberto et al., 2022).

Figura 10 – Seção crítica analisada do aterro



Fonte: Adaptado de CVR (2023)

Modelos Numéricos

a. Balanço Hídrico

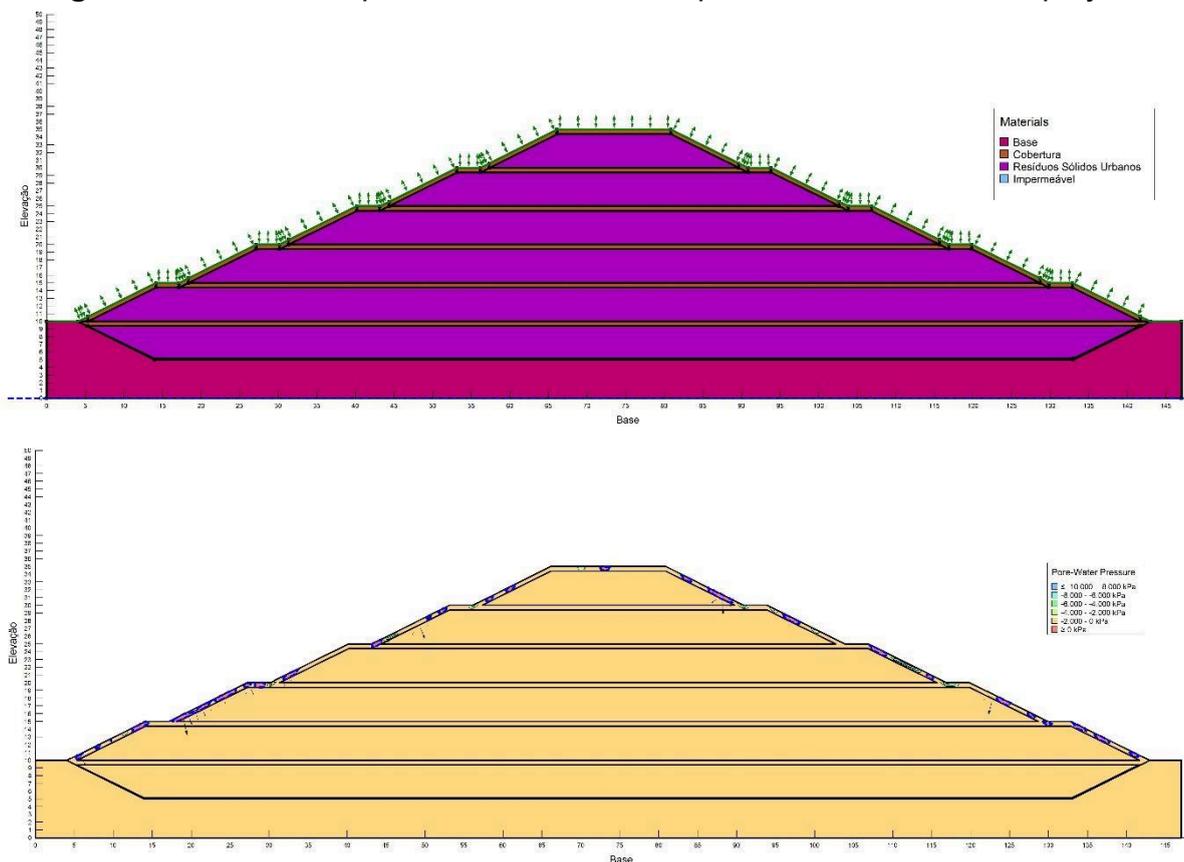
Conforme apresentado na Figura 9, foram simulados dois cenários para avaliação do balanço hídrico da célula do aterro sanitário.

- i. Cenário 1: Sem a camada de armazenamento e liberação, com cobrimento em solo natural compactado sem vegetação
- ii. Cenário 2: Sem a camada de armazenamento e liberação, com cobrimento em solo natural compactado com vegetação

Estes cenários vêm sendo aplicados sobre as células em construção e seguirão até a cota final de projeto. As situações em execução, com e sem vegetação, foram investigadas para avaliar as possíveis diferenças no balanço hídrico da camada de cobertura uma vez que a parcela importante das águas pluviais pode fluir para o interior do maciço gerando, conseqüentemente, maior

volume de efluentes. Nesta fase, a geometria do talude e a existência de cobertura vegetal são consideradas, pois podem impactar no processo de eficiência de longo prazo da estanqueidade da célula, já que um movimento superficial das águas pode ocasionar a perda de material por erosão. A célula analisada constitui de 5 níveis de alteamento, com (a) e sem (b) cobertura vegetal, conforme Figura 11.

Figura 11 – Célula esquemática onde foram aplicados os cenários de projeto



Fonte: Elaboração Própria

A geometria do aterro possui base de 32,41 x 58,00 m, inclinação de aproximadamente 30° (1:2), e cada alteamento possui altura de 5,00 m, totalizando 05 alteamentos a partir do nível natural. As análises consideraram o cenário com uma única camada terrosa de cobertura como sistema inicial e o cenário com uma camada terrosa associada a vegetação rasteira (gramínea), aplicando-se os parâmetros geotécnicos descritos anteriormente:

- i. *Top Soil*: que é a camada mais superficial do sistema e onde são aplicadas as condicionantes climáticas, aplicado no cenário 1;
- ii. Camada de solo com vegetação, aplicado no cenário 2;
- iii. Camada de resíduo confinada;

- iv. Camada de fundo contendo uma manta geotêxtil não tecido de polipropileno (900g/cm²), Geomembrana de PEAD, GCL 5000 g/m² e solo compactado como barreira impermeável, para impedir a passagem de lixiviados para o terreno natural.

b. Estabilidade de Taludes

No estudo de estabilidade dos taludes, foi utilizado o software Geostudio Slope/W à luz da norma ABNT NBR 11682/2009 a fim de se obter o fator de segurança (FS) da geometria do aterro utilizando o conjunto solo + resíduo. A ferramenta exige a entrada dos parâmetros mecânicos, estruturais e de inclinação a partir da seção de corte do aterro. Estes valores foram obtidos dos memoriais pertencentes ao acervo do empreendimento, cujos valores estão na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros geotécnicos inseridos no Geostudio Slope/W

| Camadas | Peso específico γ (kN/m ³) | K (m/dia) | Coesão (kPa) | Ângulo de Atrito (°) |
|------------------|---|-----------------------|--------------|----------------------|
| Cobertura | 19,00 | $1,03 \times 10^{-7}$ | 20,00 | 30 |
| RSU | 9,26 | $2,08 \times 10^{-2}$ | 13,5 | 22 |
| Base | 15,936 | $1,22 \times 10^{-3}$ | 10,00 | 31 |

Fonte: JC Sondagens (2020); Geotech (2020); CVR (2023)

Com a definição de seção crítica (Figura 10 e 11), foram aplicados os métodos de equilíbrio limite de Janbu e Spencer para análise de estabilidade de taludes e obtenção dos valores do FS mínimo. O menor valor de FS indica a superfície crítica de ruptura do talude, determinando então o grau de suscetibilidade de movimento de massa.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

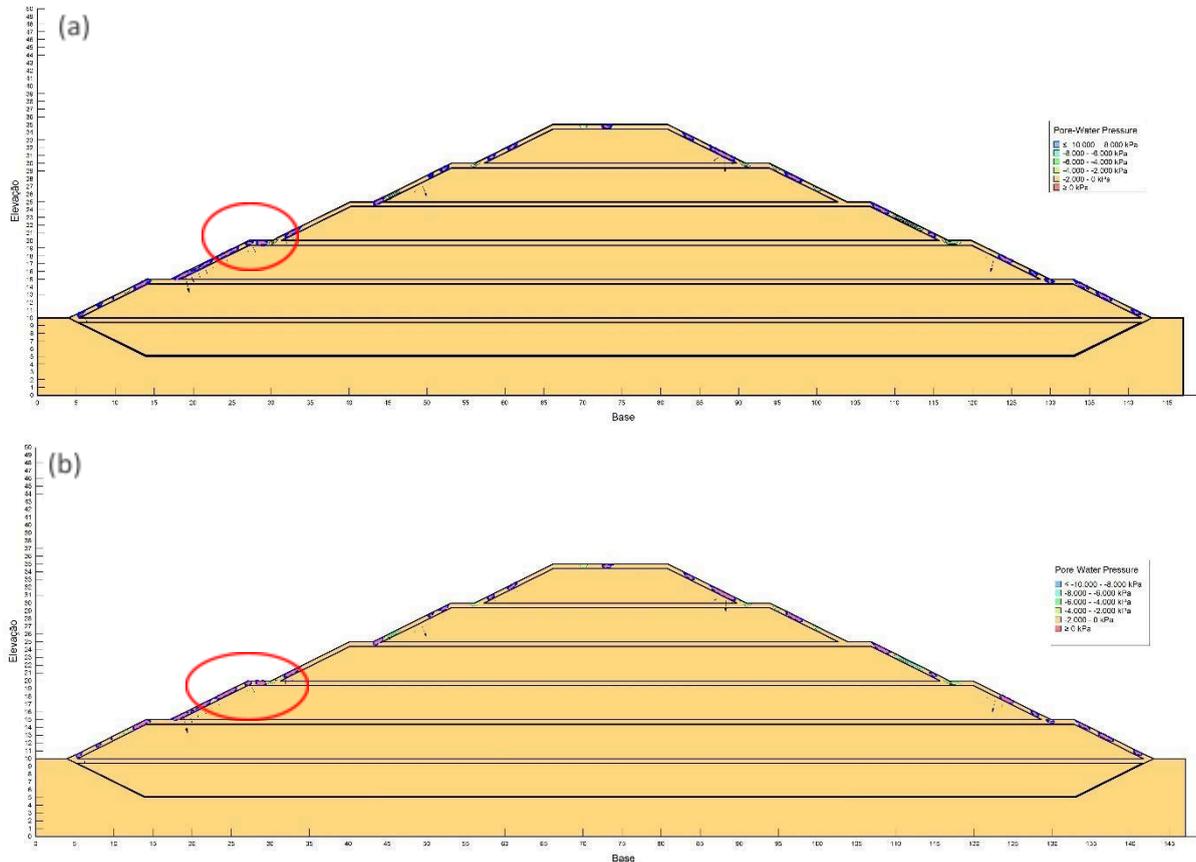
Resultado do Modelo Numérico: Balanço Hídrico

- a. Cenário 1: sem a camada de armazenamento e liberação, com cobrimento em solo natural compactado sem vegetação:

Neste cenário foi considerado uma cobertura terrosa com 60 cm sobre a célula sem a vegetação deixando o solo compactado exposto. Foi avaliada a condição crítica com o solo de cobertura saturado pela precipitação para avaliar o

comportamento do sistema de proteção quanto a permeabilidade para o interior do maciço em um período de retorno de 0 a 60 dias e de 0 a 180 dias, respectivamente, conforme a Figura 12 (a) e (b).

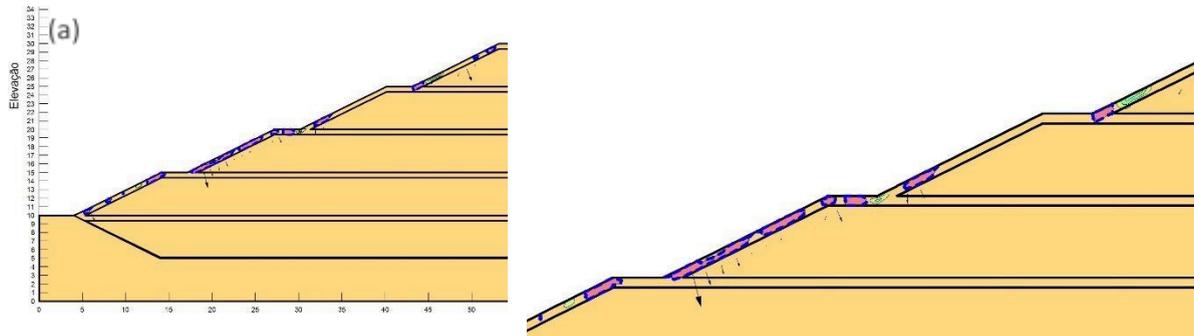
Figura 12 - Isóbaras de poropressão do Cenário 1 no (a) dia 60 e no (b) dia 180.



Fonte: Elaboração Própria

A Figura 13 evidencia os trechos hachurados indicando maior acúmulo de poropressão e permeabilidade da camada terrosa, enquanto as setas indicam a direção predominante com concentração das águas que infiltraram no maciço pela camada de cobertura, para o período (a) 0-60 dias e (b) 0-180 dias. Estes locais são classificados como críticos e devem ser trabalhados para evitar problemas futuros, já que a interseção entre os vetores e as zonas hachuradas indicam os locais menos estanque, permitindo uma maior entrada das águas pluviais e consequentemente maior produção de chorume.

Figura 13 – Destaque da isóbara de pressão do Cenário 1 para (a) o dia 60 e (b) o dia 180.



Fonte: Elaboração Própria

Verifica-se na Figura 13 (a) e (b) que para o sistema sem cobertura vegetal, há um grande acúmulo e passagem das águas pluviais para o interior do maciço tanto para o período de 60 dias quanto para o de 180 dias de análise, indicando um ponto de fragilidade no confinamento do RSU na célula. A longo prazo, podem ocorrer:

- i. Lixiviação do RSU e acúmulo no fundo da célula de efluente com grande carga orgânica (chorume) que, se não for removido para a lagoa de tratamento e ocorra falha no sistema de impermeabilização de fundo, pode gerar contaminação no terreno natural. A contaminação do lençol freático possui baixa probabilidade devido a sua grande profundidade conforme descrito na caracterização da área de estudo;
- ii. O grande acúmulo do efluente no interior do maciço junto com a grande pressão devido a compactação e sobrecarga, este efluente poderá ser expulso por meio da própria camada de cobertura por se tratar da camada mais frágil. Este processo se dá por exsudação do material a partir das saias do talude, conforme pode ser visto atualmente no aterro (Figura 14).

- iii. O acúmulo de efluente no maciço pode aumentar a massa específica do RSU e facilitar os processos de ruptura devido a redução da coesão entre o material terroso e os próprios elementos constituintes do resíduo;
- iv. O sistema sem a vegetação é passível a desagregação das partículas terrosas durante o período chuvoso, seja por impacto das gotas ou por transporte devido ao escoamento superficial. Como pode ser visto na Figura 14, a gestora da UT utiliza uma cobertura auxiliar com lonas para reduzir este efeito. No entanto, na operacionalização do aterro tal situação não é a com melhor economicidade.

Figura 14 – Exsudação do efluente na célula analisada.



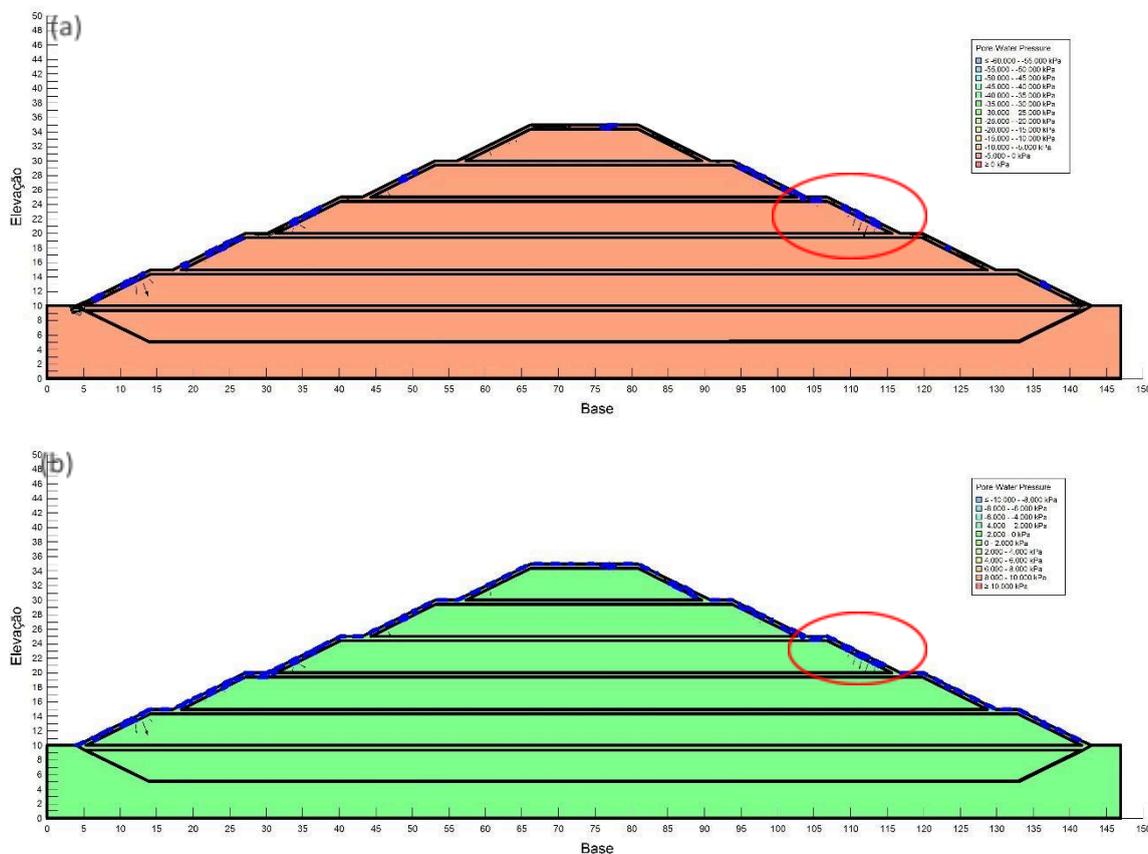
Fonte: Elaboração Própria

Verificando as Figura 12 e Figura 13, nota-se que a condição crítica se dá para o período entre 0 e 180 dias, considerando o solo saturado devido às chuvas periódicas e não haver tempo da perda de água por evaporação. As frentes de umedecimento são mais profundas na camada de cobertura, pois a capacidade de impermeabilização do solo é exaurida, permitindo um fluxo de percolação contínuo. Neste período, há maior produção de efluentes exigindo um maior monitoramento do sistema de drenagem para evitar problemas de colmatação e/ou um transbordamento da lagoa de percolados. Além disso, este período aumenta a suscetibilidade ao movimento de massa devido aos excessos de poropressão interna no maciço.

- b. Cenário 2: Sem a Camada de Armazenamento e Liberação, com Cobertura em Solo Natural Compactado com Vegetação

Neste cenário foi considerado uma cobertura terrosa de 60 cm sobre a célula com vegetação de cobertura. A condição crítica foi avaliada com o solo de cobertura saturado para avaliar o comportamento do sistema de proteção quanto a permeabilidade para o interior do maciço em um período de retorno de 0 a 60 dias e de 0 a 180 dias, respectivamente, conforme a Figura 15 (a) e (b).

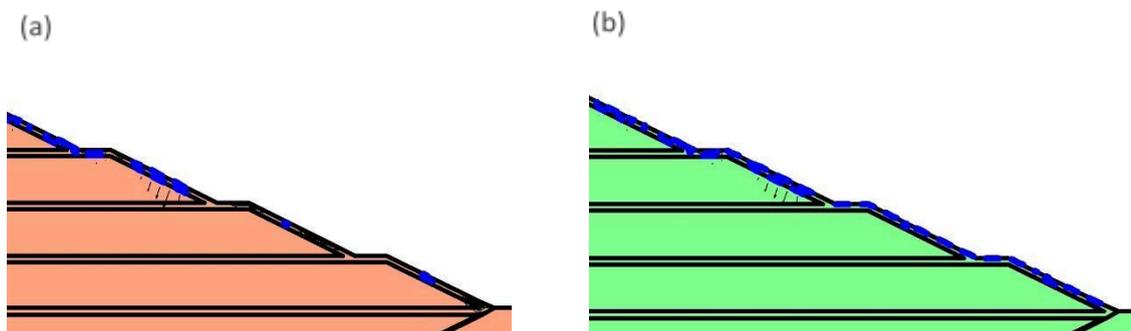
Figura 15 - Isóbaras de poropressão do Cenário 2 no (a) dia 60 e no (b) dia 180.



Verifica-se que há um acúmulo de poropressão no sistema de cobertura da célula (trechos hachurados), com alguns pontos de entrada de fluidos devido ao excesso de umidade (vetores). Na Figura 16 (a) e (b), há um recorte com detalhe dos trechos para o dia 60 e dia 180, respectivamente. Nota-se que os trechos com maior poropressão ficam restritos a camada de cobertura, o que pode indicar eficiência do sistema de cobertura vegetal na proteção superficial, incluindo os efeitos de seu sistema radicular que reduzem o avanço da frente de umedecimento e consequentemente na produção de efluentes. Esta condição fica evidente para as

condições críticas de alta saturação do solo apresentadas, indicando que o sistema possui boa estanqueidade e garantindo a segurança ambiental e estrutural da célula devido ao baixo acúmulo de efluentes no interior do maciço e da produção de chorume.

Figura 16 – Destaque da isóbara de pressão do Cenário 2 para (a) o dia 60 e (b) o dia 180.



A longo prazo, podem ocorrer:

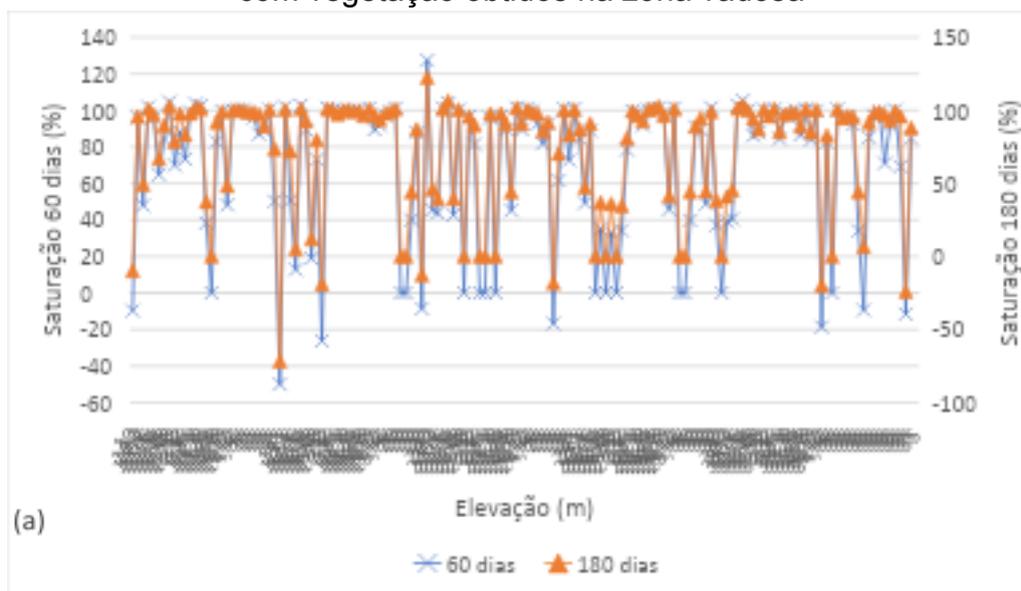
- i. Uma menor lixiviação do RSU devido ao sistema ser mais eficiente, além do efeito gerado pelo sistema radicular no “bombeamento” das águas infiltrantes por evapotranspiração, que se soma a evaporação superficial;
- ii. O sistema radicular da gramínea permite uma maior agregação do solo, enquanto o sistema foliar uma proteção contra impactos das gotas de chuva, reduzindo o efeito de transporte do material por escoamento superficial devido ao aumento da rugosidade e redução da velocidade das águas;
- iii. Os vetores indicam que há uma entrada pontual das águas pluviais em locais específicos. Deve-se instrumentar o local e instalar um sistema de proteção adicional como uma camada impermeável que encaminhe as águas acumuladas para as canaletas de drenagem;

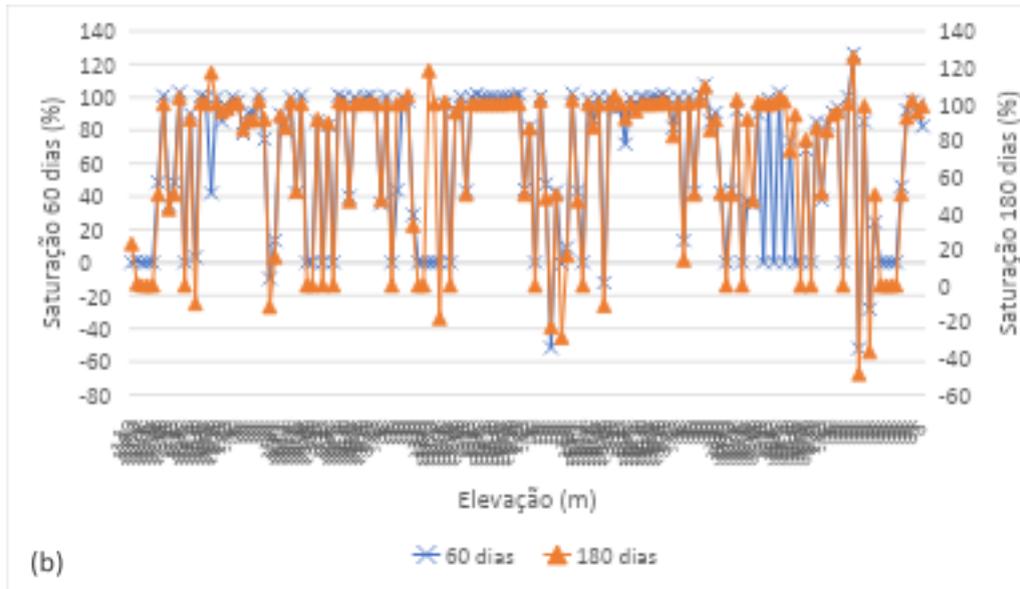
c. Gráfico de Saturação e Elevação

As Figuras 17 (a) e (b) apresentam os valores de saturação e elevação matricial das águas na camada de cobertura terrosa da superfície do aterro.

- i. A amplitude de saturação e elevação matricial varia de -50 a 125 kPa para o Cenário 1 somente com a cobertura de solo, indicando que há efeito de sucção nas zonas não saturadas (*zona vadosa*) que geram aumento na coesão das partículas, enquanto que em outras há excessos de poropressão que ampliam a suscetibilidade aos movimentos de massa aos 60 dias. Os pontos críticos para máxima sucção encontra-se aos 15,50 m, ou seja, no terceiro nível de alteamento, enquanto a máxima saturação encontra-se aos 20,0 m, no quarto nível de alteamento.
- ii. Já para o Cenário 2, com a cobertura terrosa associada a vegetação rasteira, os valores matriciais e de poropressão limites variam entre -65 kPa e 125 kPa aos 180 dias nas zonas mais altas, acima dos 35,0 m, com isso, as condições críticas de mobilização impactam apenas o topo do maciço que confinam menos resíduos, indicando uma melhor condição de segurança.

Figura 17 – Perfil de saturação da camada de cobertura (a) sem vegetação e (b) com vegetação obtidos na zona vadosa





Resultado do Modelo Numérico: Estabilidade de Taludes

Foram avaliadas as condições críticas de estabilidade global e local da célula quanto ao movimento de massa em sua máxima capacidade de carga e confinamento. Para isto foram aplicados os métodos de equilíbrio limite de Spencer e Janbu para a obtenção da curva provável de ruptura e do Fator de Segurança (FS) usando o software Geostudio Slope/W.

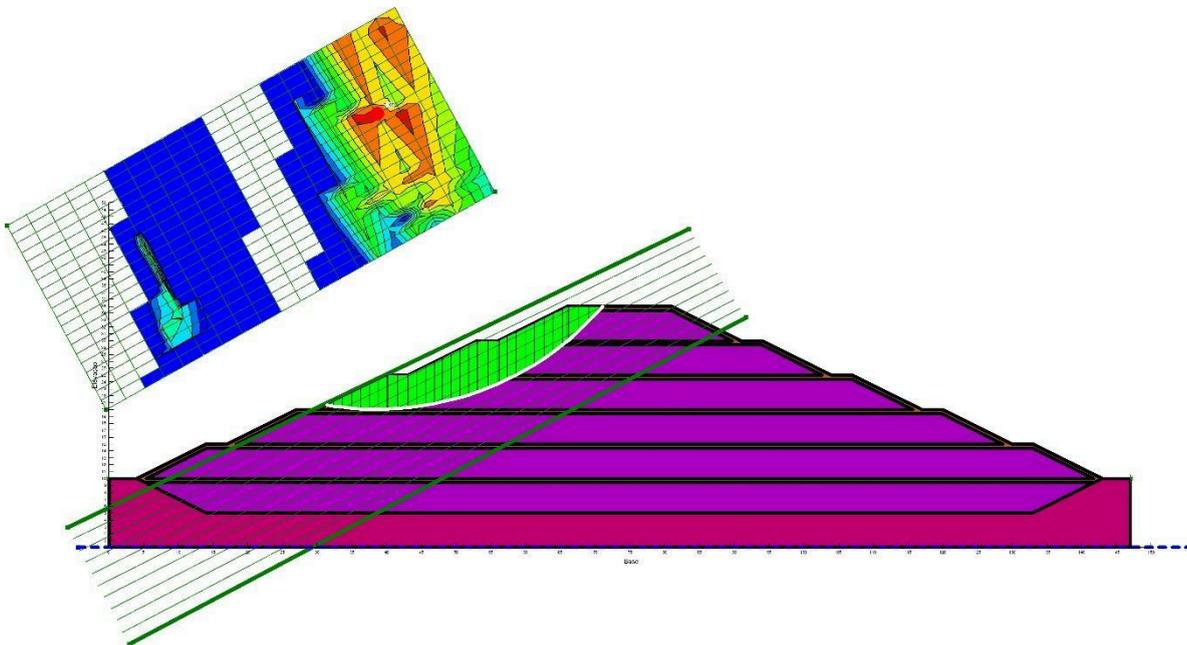
À luz da norma NBR 11.682/2009 que discute os critérios para se considerar um talude estável, verifica-se na Tabela 4 que os valores obtidos para o Fator de Segurança (FS) obtidos após análise de estabilidade global e local da massa de solo-resíduo, ficaram acima dos valores mínimos recomendados, ficando na faixa superior a $FS > 2,0$, enquanto a norma indica como segurança mínima $FS = 1,50$.

Tabela 4 - Valores de FS obtidos pela análise com o Geostudio Slope/W

| | Tipo de análise | |
|----|-----------------|-------|
| | Spencer | Janbu |
| FS | 2,120 | 2,106 |

Na Figura 18 é apresentado o menor FS obtido pelo modelo numérico de Janbu, ou seja, a geometria em questão, apesar de sua altura e volumes confinados de resíduos, possui estabilidade global e local suficientes por todo o ciclo de vida operacional do aterro e indo além. Não há recomendações de alterações para a geometria em questão. Como houve atendimento dos critérios de estabilidade para o método mais “inseguro” então todos os demais podem ser considerados como estáveis por serem maiores.

Figura 18 – Análise de estabilidade pelo método de Janbu.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Levando em consideração os resultados das condicionantes de segurança obtidos nas análises realizadas por meio do Geostudio Vadoso/W e do Geostudio Slope/W, conclui-se que o aterro sanitário da região sul da Bahia pode ser considerado estável do ponto de vista geotécnico, atendendo aos requisitos da norma ABNT NBR 11.682/2009, que define os valores de fator de segurança mínimos para projetos de estabilidade de taludes e encostas, pois obteve valores de fatores de segurança superiores a 1,50.

Todavia, é preciso pontuar a respeito da estanqueidade da célula. Nota-se que a ausência de uma vegetação no talude gera uma grande ocorrência na passagem de líquidos e geração de percolados, além de um acúmulo excessivo na

camada de cobertura. Tal situação acarreta em uma maior produção de lixiviados, impactando os aspectos de segurança ambiental, patrimonial e estrutural. Em contrapartida, nas situações em que foram empregadas uma camada de vegetação, pode-se observar uma diminuição na infiltração da precipitação, indicando a necessidade de dimensionamento de um sistema auxiliar de cobertura para proteção do resíduo, seja por meio de um novo tipo de solo para camada de armazenamento ou até de uma geomembrana, para auxiliar na eficiência da cobertura.

A espessura da camada de solo do talude é outro ponto a ser abordado. O projeto especifica uma camada mínima de 0,60 m de material granular sobre o resíduo, sendo este valor aplicado nos modelos numéricos. Pode-se inferir que a execução de camadas menores que 0,60 m será mais permeável às águas pluviais, podendo inclusive, gerar excessos de poropressão na célula propiciando a geração de maior volume de efluentes (chorume) e aumentando o risco de danos ambientais. Sugere-se para estudos futuros, uma modelagem com outras espessuras de solo ou até camadas mais esbeltas com solos com diferentes permeabilidades. Outro fator imprescindível é o acompanhamento das condições climáticas e eventos pluviométricos excepcionais com maiores volumes de chuva, uma vez que este é um fator importantíssimo na avaliação do ciclo de vida do aterro sanitário, além de controlar os custos operacionais durante os trabalhos diários.

Por fim, por meio desse estudo, pode-se ampliar as discussões para a análise de taludes com outras composições de materiais ou multicamadas como o do aterro sanitário em questão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADES, Silvana Alves de et al. Estudo do fator de segurança de um aterro sanitário tipo convencional comparando com um aterro sanitário tipo encosta. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – UTFPR). 2018. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/3307>

ARAÚJO NETO, Cláudio Luis de et al. Modelagem da resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos para análises da estabilidade de taludes de aterros sanitários. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental – UFCG). 2021. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/26569>

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 8419/1992: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos – procedimento. Rio de Janeiro, 1992.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 13896/1997 - Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 10.007/2004 – Amostragem de resíduos sólidos

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 15849/2010 - Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 11682/2009 – Estabilidade de Encostas

BAYER, Natássia Molina; URANGA, Paulo Ricardo Ricco; FOCHEZATTO, Adelar. A curva ambiental de Kuznets na produção de resíduos sólidos domiciliares nos municípios brasileiros, 2011-2015. *Economia e Sociedade*. V 31. N 1. Abril. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1982-3533.2022v31n1art06>

BENVENUTO, C.; CUNHA, M. A. Escorregamento em massa de lixo no aterro sanitário Bandeirantes em São Paulo. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITO E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS, 2. 1991, Rio de Janeiro. Anais., Rio de Janeiro: ABMS, 1991, v. 2, p.55-66.

BENVENUTO, C. Monitoramento geotécnico e a estabilidade dos aterros sanitários. *Revista Limpeza Pública*, São Paulo, V. 77, N. 2, P.28-45, JUN. 2011. Trimestral. Disponível em: https://www.ablp.org.br/wp-content/uploads/2022/07/edicao_0077.pdf

BERGUENMAYER, Andressa Martins; SILVA, Beatriz Machado de Oliveira; BESERRA, Thaís Tavares. A renda per capita e a relação com a produção de resíduos sólidos urbanos do Distrito Federal. *Brazilian Journal of Development*. v 6. N 8. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n8-018>

BORBA, Willian Fernando de et al. Avaliação da contaminação ambiental em um aterro sanitário de pequeno porte, sem utilização de geomembrana, na região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. 2019. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/18501>

BORBA, Silvana Alves. Estudo do fator de segurança de um aterro sanitário tipo convencional comparando com um aterro sanitário tipo encosta. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/3307>

BORBA, Willian Fernando et al. Permeabilidade do solo em área de aterro sanitário. *Caderno de Geografia*, v. 30, n. 61, p. 272-272, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2020v30n61p272>

BOSQUILIA, Samira Gaiad Cibim de Camargo; MARTIRANI, Laura Alves. Consumo e geração de resíduos: estudos de caso em Piracicaba e Saint Petersburg. *Geomae*. v. 10. n. 2. 2019. Disponível em: <https://periodicos.unespar.edu.br/geomae/article/view/7685>

BRASIL. Lei 12.305, de 12 de Agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm

CARVALHO, Miriam. Fatima. Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos. 1999, 300 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001053706>

CBPM. Companhia Baiana de Pesquisa Mineral. Cartografia Geológica. 2024. Disponível em: <https://geosgb.sgb.gov.br/downloads/>

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução 430 de 13/05/2011. Condições e padrões de lançamento de efluentes. Livro de Resoluções 1984-2012. P. 420-427. janeiro 2012. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/images/conteudo/LivroConama.pdf>

CONDER. COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO URBANO DO ESTADO DA BAHIA (CONDER). Relatório Final: Diagnóstico Institucional da Gestão de Resíduos Sólidos nos Municípios de Ilhéus e Uruçuca, Ilhéus: (documento interno). Salvador: CONDER, 2020.

COSTA, Magdalena Duarte. Estudos de Camadas de Cobertura de Aterros Sanitários em Colunas de Solos. 2015. 144 f. Tese (Doutorado) -Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/14242>

COSTA, Magdalena Duarte; MARIANO, Maria Odete Holanda; ARAUJO, Leila Barros; JUCÁ, José Fernando Thomé. Estudos laboratoriais para avaliação do desempenho de camadas de cobertura de aterros sanitários em relação à redução de emissões de gases e infiltrações. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 23, p. 77-90, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018160393>

CVR Costa do Cacau. Relatório Operacional Interno – Unidade Ilhéus/BA. 2023

DACIOLO, Leonardo Vinícius Paixão. Parâmetros de resistência de RSU: abordagem probabilística para análises de estabilidade de taludes de aterros de resíduos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – UFSCAR). 2020. <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12886>

DALL'AGNOI, Ana Luiza Bertani; NAZARI, Mateus Torres; AFONSO, Thays França; CORREA, Érico Kunde; QUADRO, Maurizio Silveira. Dimensionamento da área necessária para a instalação de um aterro sanitário em um município de médio porte. 2º Congresso Sul-americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade. 2019. <https://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2019/XI-027.pdf>

DIAS, Sylmara Gonçalves. O desafio da gestão de resíduos sólidos urbanos. GV-executivo, v. 11, n. 1, p. 16-20, 2012. Disponível em: <https://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/gvexecutivo/article/download/22776/21542>

FARIA, Diego; LEITE, Laís; OLIVEIRA, William. Análise da Viabilidade Econômica e Financeira do Uso do Biogás como Geração de Receita Acessória: Um Estudo de Caso no Aterro CVR Costa Do Cacau, Ilhéus/Ba. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil – Unifacs). 2022. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/27019>

FERNANDES, Danielly Abadia. A importância da implantação do aterro sanitário na cidade de Iraí de Minas-MG. 2019. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/26888>

FERREIRA, Iara Jeanice Souza; GONÇALVES, Emanuela; RODRIGUES, Heitor de Santana; AMORIM, Miriam Cleide Cavalcante de. Caracterização física dos resíduos sólidos domésticos e dimensionamento de área para aterro sanitário no município de Sobradinho-BA. Tecno-lógica. v 23. n 1, p 49-58. julho de 2019. Santa Cruz do Sul. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/228489268.pdf>

FREITAS, Jeremy Carlos; JÚNIOR, José Tavares Araruna. Concepção de um Programa de Monitoramento Geotécnico para a CTR de Macapá – Amapá. In. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg). p 5680-5687. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/cobramseg.2022.0715>

GEOTECH, Geotecnia Ambiental Consultoria. Projeto executivo da Fase C do Aterro Sanitário CVR. Vol. 02. Memorial Técnico. Setembro 2023.

GIORGINI, Michelle Granha; CATAPRETA, Cícero Antônio Antunes; SIMÕES, Gustavo Ferreira. MODELAGEM DE RECALQUES DE LONGO PRAZO DE UM ATERRO SANITÁRIO EXPERIMENTAL – ANÁLISE CRÍTICA DE TRÊS MODELOS EMPÍRICOS. Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica. 14, 1 (abr. 2021), 107–121. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2021.14.1.69962>

GODECKE, M. V., NAIME, R. H., FIGUEIREDO, J. A. S. O consumismo e a geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, 8(8), 1700–1712. 2013. <https://doi.org/10.5902/223611706380>

GOMES, L. P. (Coord.). Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras. Rio de Janeiro: ABES, 2009, 358 p.

HELENE, Livia Portes Innocenti. Dinâmica da geração e fluxo de chorume em aterro sanitário de pequeno porte a partir de monitoramento geofísico. Rio Claro, 2019. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/183095>

IUNES, Augusto Silva. Estudo de vulnerabilidade ambiental à contaminação dos aquíferos nas proximidades do aterro sanitário de Brasília. 2020. 77 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) — Universidade de Brasília, Brasília, 2020. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/31307>

JC SONDAGENS. Relatório Técnico – Perfil de Sondagem à Percussão. 2020.

JUCÁ, J. F. T. Destinação final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil: situação e perspectivas. In: seminário sobre resíduos sólidos, 2., 2004, São Paulo. Anais... São Paulo: ABGE, 2004.

JUNIOR, Alex Air Santiago et al. Aterro Sanitário: Relevância e técnicas de impermeabilização do solo. *Divers@!*, v. 13, n. 2, p. 142-153, 2021. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/diver/article/download/76911/42975>

LOPES, Renata Costa; SILVA, Raquel Naiara Fernandes. Uso de lógica booleana na triagem de áreas aptas para a implantação de aterro sanitário no Município de Campina Verde, Minas Gerais, Brasil. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*. V.7. N.16. P 487-499. ago 2020. Disponível em: [https://doi.org/10.21438/rbgas\(2020\)071603](https://doi.org/10.21438/rbgas(2020)071603)

MARQUES, A. C. M. Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos. 2001. 350 p. + anexos. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.18.2001.tde-07082007-162407>

MARINHO, Matheus Kamanducaia Soares; CAMARGO, Diogo Luiz Quixabeira. Análise ambiental da operação do aterro sanitário de Porto Nacional (TO). *Rev. Ibero-Americana de Ciências Ambientais*. v 14. n 3. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2023.003.0009>

MENEZES, Rosana Oliveira; CASTRO, Samuel Rodrigues; SILVA, Jonathas Batista Gonçalves; TEIXEIRA, Gisele Pereira; SILVA, Marco Aurélio Miguel. Análise estatística da caracterização gravimétrica de resíduos sólidos domiciliares: estudo de caso do município de Juiz de Fora, Minas Gerais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. v 24. n 02. Apr 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019177437>

NASCIMENTO, Leonardo Alberto do. Modelagem tridimensional de um aterro sanitário de grande porte. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil – UFSM). 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/23717>

NEVES, João Pedreira das; SOUZA, João Dalton de. Projeto Mapas Metalogenéticos e de Previsão de Recursos Minerais: Folhas SD.24-Y-B Ilhéus e SD.24-Z-A Itacaré. CPRM – Serviço Geológico Brasileiro. 1984. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/7595>

NORBERTO, Alison de Souza et al. Análise da correlação estatística de parâmetros e sensibilidade do Fator de Segurança (FS) da estabilidade de taludes de aterros sanitários. Revista Geama, v. 8, n. 2, p. 20-33, 2022. Disponível em: <https://www.journals.ufrpe.br/index.php/geama/article/download/4604/482484675>

OLIVEIRA, R. F. de, BRAGA, R. M. Q. L. Sistema de cobertura final de um aterro sanitário para a rmb de belém-pa com emprego de resíduos da construção civil. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, 6(3), 573–596. 2017. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v6e32017573-596>

OLIVEIRA, Mariele Rodrigues de; SOUZA, Lana Kany Torres; OLIVEIRA, Laís Roberta Galdino de. A influência da espessura da camada e do grau de compactação no desempenho de camadas de cobertura de aterros sanitários. Revista Eletrônica de Engenharia Civil. V 19. N 1. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/reec.v19i1.74277>

PARDINHO, Barbara Sophia; SANTOS, Pietra Roque dos. Análise das técnicas construtivas e de operação de aterros em atendimento às normas brasileiras. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil - UNESP). 102p. 2021. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/215866>

PEREIRA, M. de P.; SOUZA, K. S. Política nacional de resíduos sólidos (pnrs): avanços ambientais e viés social nos municípios de pequeno porte. Ciências Sociais Aplicadas em Revista, [S. I.], v. 17, n. 32, p. 189–210, 2017. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/csaemrevista/article/view/17509>

PROTASIO, Fernando Nóbrega Mendes. Caracterização do resíduo sólido urbano do aterro controlado de jardim gramacho. Graduação em Engenharia Ambiental. Departamento de Engenharia Civil. PUCRJ. Rio De Janeiro. 2013.

RIBEIRO, Libânia da Silva; BATISTA, Gabriele de Souza; ARAÚJO, Cristiane Souza de; SOUSA, Ketlyn Jaquelize Lima. Avaliação de desempenho de aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos no semiárido brasileiro. Rev. Brasileira de Gestão e Sustentabilidade. V10. N 25. P 803-820. Ago-2023. Disponível em: <https://revista.ecogestaobrasil.net/v10n25/v10n25a17a.html>

ROTH, Caroline das Graças; GARCIA, Carlos Mello. A influência dos padrões de consumo na geração de resíduos sólidos dentro do sistema urbano. *Redes. Revista do Desenvolvimento Regional*, v. 13, n. 3, p. 5-13, 2008. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/5520/552056853001.pdf>

SANTIAGO, Cristine Diniz; MAROTTI, Ana Cristina Bagatini; PUGLIESI, Erica; GONÇALVES, Juliano Costa. Política Nacional de Resíduos Sólidos: perspectivas após um decênio de sua promulgação. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*. V 62. P 152-177. Dez-2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/dma.v62i0.81833>

SILVA, Poliana Martins et al. A GESTÃO INCORRETA DO ATERRO SANITÁRIO DE MARABÁ-PA, UMA REVISÃO. **Revista Balaio Acadêmico-ISSN 2966-1838**, v. 1, n. Especial, 2024. Disponível em: <https://publicacoes.ifpa.edu.br/index.php/rbac/article/download/264/128>

SILVA, W. K. A. S., & Tagliaferro, E. R. Aterro sanitário - a engenharia na disposição final de resíduos sólidos / Landfill - engineering in the final disposal of solid waste. *Brazilian Journal of Development*, 7(2), 12216–12236. 2021. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n2-0377>

SOUZA, Thais Simões Coelho de. Dimensionamento de Sistemas de Coberturas com Solo para um lago de Rejeito por Meio de Simulações Numéricas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Viçosa). 2015. Disponível em: <https://locus.ufv.br/items/e19797b2-95a5-483e-89cc-06803742333b>

SPÍNOLA, Emanuela Oliveira. A participação na implementação da política nacional de resíduos sólidos em Ilhéus-BA: “gestão compartilhada”. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana – UFBA). <http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/22952>.

SPINOLA, Gabriela Monteiro Rodrigues; DE ANDRADE, Pedro Ribeiro; NASCIMENTO, Victor Fernandez. Caracterização e dimensionamento de aterros sanitários para resíduos sólidos urbanos no Brasil e nos municípios paulistas. Relatório final de projeto de iniciação científica. Inpe: São José dos Campos, SP, 2017. Disponível em: http://mtc-m21c.sid.inpe.br/attachment.cgi/sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/06.08.19.01/doc/spinola_caracterizacao.pdf

SODRÉ, Giordani Rafael Conceição; FREITAS, Stephanie Jael Negrão de; RODRIGUES, Jeferson Botelho; IGAWA, Tassio Koiti; AMORIM, Islia Lima de Sousa; CABRAL, Ana Carla Leite Carvalho. Avaliação sustentável para instalação de aterro sanitário em uma cidade da Amazônia oriental. *Rev. Ibero-Americana de Ciências Ambientais*. v 13. n 3. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.6008/CBPC2318-2881.2020.003.0011>

SOUZA, Cristiano Marcelo Pereira de; SILVA, Keyth Fabianne Machado Cordulinda; MOREAU, Ana Maria Souza dos Santos. Avaliação do potencial de uso urbano da cidade de Ilhéus (BA). Revista Brasileira de Geografia Física. V 7. N 1. P 165-179. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v7.1.p165-179>

TISTU AMBIENTAL. Relatório da análise gravimétrica preliminar na CVR Costa do Cacau. Vol. 01 Rev. 01. 2022.

Recebido em 12 de fevereiro de 2024

Aceito em 24 de janeiro de 2025