



Aterros de Resíduos Perigosos: Boas Práticas e Desafios Frente à Economia Circular
Hazardous Waste Landfills: Best Practices and Challenges in the Face of a Circular Economy

Recebimento: 30/12/2024 - Aceite: 17/09/2025 – Publicação: 27/10/2025

Processo de Avaliação: Double Blind Review – <https://doi.org/10.22567/rep.v14i2.1066>

Pedro Lombardi Filho

pedro.lombardi.filho@usp.br

<https://orcid.org/0000-0002-3769-8786>

Universidade de São Paulo (USP)

Giovano Candiani

gcandiani@unifesp.br

<https://orcid.org/0000-0001-9896-4390>

Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP)

Wanda Maria Risso Günther

wgunther@usp.br

<https://orcid.org/0000-0002-2503-0957>

Universidade de São Paulo (USP)

RESUMO

A gestão inadequada de resíduos sólidos perigosos impõe riscos ambientais e de saúde pública, demandando alternativas sustentáveis. Este estudo objetiva avaliar as práticas operacionais em Aterros Classe 1 e analisar o potencial da Mineração de Aterro como estratégia de economia circular para a remediação e a recuperação de matéria-prima em locais de disposição final. O caso de estudo central é o Aterro Caieiras, em São Paulo (SP), Brasil. A metodologia empregou revisão bibliográfica, análise documental e inspeções de campo para avaliar os aspectos de projeto, construção, operação e encerramento do aterro, verificando a conformidade com as regulamentações vigentes para Aterros Classe 1. Os resultados confirmam que o Aterro Caieiras-SP adota práticas de gestão e engenharia compatíveis com a legislação. A análise do processo de Mineração de Aterro indica a possibilidade de geração de receita, criação de postos de trabalho e redução do passivo ambiental. Contudo, o estudo ressalta a necessidade de avaliações aprofundadas sobre a viabilidade econômica e os impactos socioambientais da aplicação em resíduos perigosos. Conclui-se que a Mineração de Aterro representa uma oportunidade para uma gestão mais avançada de resíduos perigosos, requerendo-se o



investimento em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias para a otimização desse processo de valorização.

Palavras-chave: resíduos perigosos, mineração em aterros, gestão de resíduos, aterro de resíduos perigosos

ABSTRACT

The inadequate management of hazardous solid waste poses environmental and public health risks, demanding sustainable alternatives. This study aims to evaluate operational practices in Class 1 Landfills and analyse the potential of Landfill Mining as a circular economy strategy for the remediation and recovery of raw materials in disposal sites. The central case study is the Caieiras Landfill, in São Paulo (SP), Brazil. The methodology employed bibliographic review, documentary analysis, and field inspections to assess the aspects of the landfill's design, construction, operation, and closure, verifying compliance with current regulations for Class 1 Landfills. The results confirm that the Caieiras Landfill-SP adopts management and engineering practices compatible with legislation. The analysis of the Landfill Mining process indicates the possibility of revenue generation, job creation, and reduction of environmental liability. However, the study highlights the need for in-depth evaluations on the economic viability and socio-environmental impacts of its application to hazardous waste. It is concluded that Landfill Mining represents an opportunity for more advanced management of hazardous waste, requiring investment in research and development of technologies for the optimization of this valorization process.

Keywords: hazardous waste, mining in landfills, waste management, hazardous waste landfill

1. INTRODUÇÃO

A crescente produção industrial, impulsionada pelo aumento da demanda e pela obsolescência acelerada de produtos, gera volumes cada vez maiores de resíduos. Entre eles, destacam-se aqueles classificados como perigosos, provenientes de diversos setores como metalurgia, química e petroquímica, cuja má gestão representa uma grave e contínua ameaça à saúde humana e ao meio ambiente (Le-Khac et al. 2024). Dados da EUROSTAT (2023) reforçam a magnitude do problema ao revelar que, em 2020, cerca de 4,4% dos 95 milhões de

toneladas de resíduos produzidos na Europa foram classificados como perigosos, sublinhando a necessidade de manejo rigoroso.

A expansão da indústria química, marcada pela proliferação contínua de novas substâncias (estimada em milhões anualmente), estabelece imperativos críticos de gestão de risco para a saúde ocupacional e a integridade ambiental. Esta situação é agravada pela disparidade temporal entre o ritmo acelerado do desenvolvimento molecular e a inércia dos quadros regulatórios e de avaliação toxicológica, resultando na exposição de trabalhadores e ecossistemas a perigos latentes e severos (OIT, 2014).

Para mitigar esses riscos no cenário nacional, o Inventário de Resíduos Sólidos Industriais, instituído pela Resolução CONAMA nº 313/2002, é uma ferramenta de gestão fundamental. Essa ferramenta visa sistematizar informações essenciais sobre a geração, características e destinação final desses materiais, permitindo um planejamento mais eficiente, o controle regulatório e a prevenção de impactos ambientais (CONAMA, 2002).

As normas brasileiras ABNT NBR 10.004-1:2024 e 10.004-2:2024 estabelecem a classificação fundamental de resíduos em Perigosos (Classe 1) ou Não Perigosos (Classe 2) (ABNT, 2024). Os resíduos perigosos são definidos por características como inflamabilidade, corrosividade ou toxicidade. A lista de resíduos industriais perigosos é extensa, incluindo solos contaminados, escórias de chumbo e lodos diversos, e sua gestão inadequada acarreta danos ambientais e riscos significativos à saúde humana (Minelgaité et al. 2019).

O gerador de resíduos perigosos possui responsabilidade legal integral sobre todo o ciclo de vida desses materiais, da geração à disposição final, devendo garantir que todas as etapas ocorram em conformidade com a legislação vigente (Barros, 2014). Para a gestão ambientalmente correta desses materiais, os Aterros Classe 1 são essenciais. Sua operação exige rigorosos cuidados técnicos, como o monitoramento constante da qualidade do solo e das águas subterrâneas (Barros, 2012), e o cumprimento de obrigações regulatórias.

A legislação nacional, especificamente a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei Federal nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010), exige que os operadores de Aterros Classe 1 se inscrevam no Cadastro Nacional de Operadores de Resíduos Perigosos (CNORP), informando ao IBAMA os resíduos recebidos e apresentando o Plano de Gerenciamento de Resíduos Perigosos (PGRP).

Este trabalho visa avaliar a conformidade ambiental de um Aterro de Resíduos Perigosos Classe 1 com a legislação vigente e analisar o potencial de implementação da

Mineração de Aterro (*Landfill Mining*) como estratégia para promover a sustentabilidade na gestão desses resíduos. Utilizando o Aterro Caieiras-SP como caso de estudo, o trabalho busca contribuir para o desenvolvimento de soluções mais eficientes e alinhadas com os princípios da economia circular.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O gerenciamento de resíduos perigosos industriais é um processo multifásico que, devido à sua complexidade e às exigências legais, é majoritariamente terceirizado. A maioria das indústrias contrata empresas licenciadas para as etapas de tratamento e disposição final (Barros, 2013). O acondicionamento, seja em contêineres, tambores ou a granel, é estritamente normatizado pela NBR 12.235/1992 (ABNT, 1992), exigindo áreas de armazenamento com pisos impermeabilizados e sistemas de contenção (Barros, 2012).

A coleta e o transporte são atividades altamente regulamentadas, exigindo autorizações específicas dos órgãos ambientais e o cumprimento de requisitos de segurança (Barros, 2013). No estado de São Paulo, o transporte requer o Certificado de Movimentação de Resíduos de Interesse Ambiental (CADRI), emitido pela CETESB, que assegura a anuência prévia do receptor (Barros, 2012). Complementarmente, o Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR), gerado pelo SINIR, garante a rastreabilidade do resíduo da origem ao destino. O destinatário, ao concluir o processo, emite o Certificado de Destinação Final (CDF) (Barros, 2014).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Federal nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010), estabelece as diretrizes e a responsabilidade legal integral do gerador sobre todo o ciclo de vida dos resíduos perigosos (Barros, 2014). O Capítulo IV da PNRS detalha obrigações como o cadastramento no Cadastro Nacional de Operadores de Resíduos Sólidos - CNORP) e a submissão de um Plano de Gerenciamento de Resíduos Perigosos (PGRP) atualizado ao Sistema Nacional de Meio Ambiente, SISNAMA (BRASIL, 2010). Embora o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), aprovado em 2022, tenha aprimorado a gestão geral, não introduziu novas diretrizes específicas para os perigosos (BRASIL, 2022).

Os critérios técnicos para projeto, construção e operação de Aterros Classe 1 são regidos pela NBR 10.157/1987 (ABNT, 1987) e dependem de licenças ambientais estaduais. Em São Paulo, a CETESB regulamenta essa gestão, exigindo licenças de instalação e operação, o

cadastro no Sistema Estadual de Gerenciamento Online de Resíduos Sólidos (SIGOR) e a apresentação de relatórios de monitoramento. Esse monitoramento contínuo é fundamental para garantir a conformidade e a proteção ambiental (Barros, 2014).

No Brasil, a destinação final de resíduos industriais perigosos privilegia soluções térmicas, notadamente a incineração (processo de tratamento de resíduos que consiste na queima controlada e completa de materiais em altas temperaturas) e o coprocessamento, prática de recuperação energética em fornos de cimento que contribui para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (Barros, 2013). Os Aterros Classe 1 são, assim, reservados estritamente para a disposição segura de rejeitos com baixo poder calorífico ou aqueles que não possuem viabilidade técnica para tratamento térmico (Barros, 2012).

Historicamente, a disposição em aterros era a principal solução, mas o cenário evoluiu: materiais como pós de aciaria e compósitos metálicos, antes descartados, agora possuem potencial de recuperação e valor de mercado (Barros, 2013). Diante disso, a gestão em aterros, antes vista como solução definitiva, migrou para um modelo mais dinâmico, onde o aterro é visto como uma contenção temporária e não mais uma disposição final (Barros, 2012).

Essa mudança impulsiona o interesse na Mineração de Aterros (*Landfill Mining*), uma prática que consiste na extração e recuperação de materiais sólidos anteriormente descartados. O *Landfill Mining* representa uma fonte secundária de insumos (Krook et al. 2013; Fricke 2009; Cossu et al. 2015), alinhando a gestão de resíduos à economia circular.

Com o objetivo de sistematizar o arcabouço normativo nacional pertinente à gestão e ao gerenciamento de resíduos perigosos, apresenta-se o seguinte detalhamento:

- ✓ NBR 10.005:2004 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos (ABNT, 2004a).
- ✓ NBR 10.006:2004 – Procedimento para obtenção de extrato solúvel de resíduos sólidos (ABNT, 2004b).
- ✓ NBR 10.007:2024 – Amostragem de resíduos sólidos (ABNT, 2024).
- ✓ NBR 10.157:1987 – Aterros de resíduos perigosos: Critérios para projeto, construção e operação (ABNT, 1987).
- ✓ NBR 12.235:1992 – Armazenamento de resíduos sólidos perigosos: Procedimento (ABNT, 1992).

- ✓ NBR 12.988:1993 – Líquidos livres: Verificação em amostra de resíduos (ABNT, 1993).
- ✓ Lei Federal nº 12.305/2010 – Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010).
- ✓ Decreto Federal nº 10.936/2022 – Regulamenta a PNRS e estabelece o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos (SINIR) (BRASIL, 2022a).
- ✓ Decreto Federal nº 11.043/2022 – Instituiu o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares) (BRASIL, 2022b).
- ✓ Decreto Federal nº 9.177/2017 – Regulamenta o art. 33 da PNRS (Logística Reversa) (BRASIL, 2017).
- ✓ Lei Federal nº 9.974/2000 – Trata de agrotóxicos e seus componentes afins (BRASIL, 2000).
- ✓ Resolução CONAMA nº 313/2002 – Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais (CONAMA, 2002).

Segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes (ABRETE), em 2006, o Brasil contava com 21 Aterros Classe 1 em operação. Três desses empreendimentos estavam localizados no estado de São Paulo, nos municípios de Caieiras, Jardinópolis e Tremembé (ABRETE, 2006).

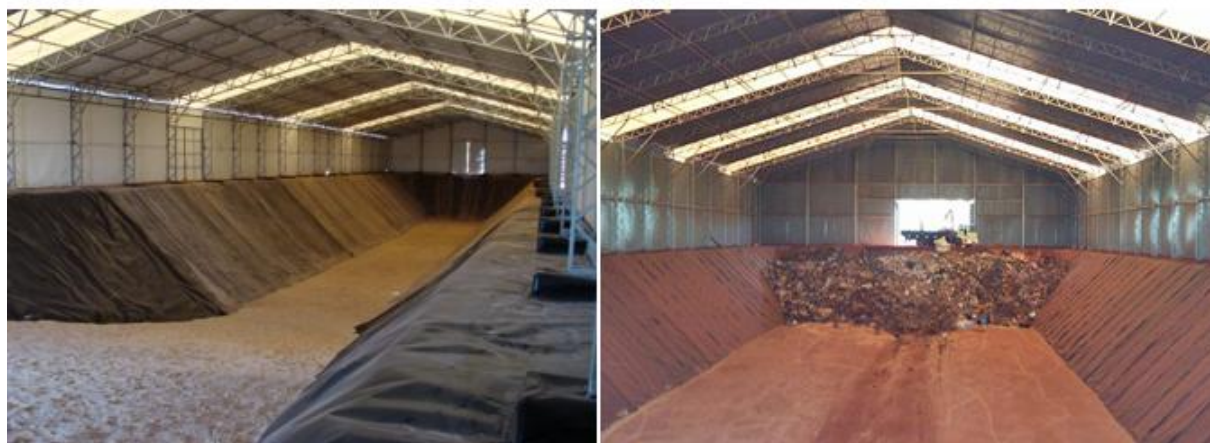
Os Aterros Classe 1 (Figura 1) são estruturas projetadas para o recebimento e confinamento seguro de resíduos perigosos no solo, seguindo rigorosos princípios de engenharia sanitária e ambiental. O projeto usualmente prevê que as células de disposição sejam escavadas abaixo do nível do terreno e operadas com cobertura móvel para minimizar a infiltração de água, evitando, primariamente, a compactação do resíduo (Barros, 2014).

A implantação desses aterros demanda uma análise rigorosa das características do local, que deve abranger: a topografia, a geologia e geotecnia do terreno, a identificação de riscos geológicos, as propriedades do solo e do subsolo, a profundidade do lençol freático e a localização de recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Essa avaliação detalhada é essencial para selecionar uma área que minimize os impactos ambientais e os riscos de contaminação (Rosenfeld e Feng, 2011; Zanon, 2016).

Figura 1

Células operacionais de aterro industrial.

A - Aterro industrial da empresa Titara. **B** - Aterro industrial da empresa.



A

B

Fonte: **A** - <https://www.cgatitara.com.br/institucional/o-que-fazemos/aterro-industrial-classe-i/>. **B** - <http://www.estre.com.br/solucoes-para-empresas/aterro-classe-i/>

A infraestrutura básica de um Aterro Classe 1 é complexa e estratificada, sendo projetada para o isolamento total do resíduo do meio ambiente. Os principais sistemas incluem (Cepollina, 2016):

Sistema de Drenagem de Base: (i) Dreno Subsuperficial: Posicionado na base do aterro e (ii) Dreno Vertical Testemunho: Instalado entre as geomembranas de PEAD (Polietileno de Alta Densidade) de 1,5 a 2,0 mm de espessura. Sua função primária é detectar e coletar possíveis vazamentos (percolações) através da camada de impermeabilização.

Sistema de Coleta de Percolado: Composto por drenos verticais e horizontais, instalados no interior da massa de resíduos, para capturar o chorume gerado.

Sistema de Captação de Águas Pluviais: Envolve a drenagem superficial e bacias de contenção impermeabilizadas com geomembrana de PEAD. A água coletada é utilizada, principalmente, para a umectação das vias de acesso ao aterro após análise e controle de qualidade.

Sistema de Cobertura dos Resíduos: Durante a operação, utiliza-se mantas de sacrifício para proteger as células ativas das águas pluviais. A cobertura final de topo é composta por múltiplas camadas: argila compactada, seguida da geomembrana, camada de solo e, por fim, o

plantio de grama. Essa estrutura visa minimizar a infiltração de chuvas e, conseqüentemente, reduzir a geração de percolado.

Sistema Lava-Rodas: De uso obrigatório na saída da área de controle para a higienização dos pneus de todos os caminhões, prevenindo a dispersão de contaminantes.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada neste trabalho combinou uma abordagem tripla: Pesquisa Bibliográfica, Análise Documental Normativa e Regulatória, e Estudo de Caso no Aterro Caieiras-SP (Aterro Industrial Classe 1).

A pesquisa bibliográfica foi conduzida para estabelecer o estado da arte e as boas práticas internacionais na gestão de Resíduos Sólidos Perigosos e na aplicação da técnica de *Landfill Mining*. A pesquisa utilizou as plataformas Scielo, CAPES/Portal de Periódicos, e Google Scholar. A busca foi orientada por palavras-chave centrais: Resíduos Perigosos (*Hazardous Waste*), Aterro Classe 1 (*Class 1 Landfill*) e Mineração de Aterro (*Landfill Mining*).

Esta etapa teve como foco a conformidade legal e técnica do gerenciamento de resíduos perigosos no Brasil e na unidade de estudo. A análise incluiu o arcabouço regulatório brasileiro (normas ABNT e legislação federal), projetos de engenharia, manuais operacionais da unidade, e Estudos de Impacto Ambiental (EIAs) específicos do Aterro Caieiras. O objetivo central foi contrastar as práticas operacionais do aterro com as diretrizes e normas ambientais e de segurança vigentes.

O Aterro Caieiras (Aterro Industrial Classe 1), localizado no estado de São Paulo, foi selecionado como estudo de caso. Foram realizadas visitas técnicas de campo e coleta de dados in situ ao longo do período de 2016 a 2020. A coleta de dados teve como propósito validar a conformidade das práticas de gestão e engenharia do aterro, especificamente em relação às diretrizes técnicas e legais brasileiras, fornecendo a base empírica para a análise de viabilidade da Mineração de Aterro (*Landfill Mining*).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Aterro Classe 1 objeto deste trabalho está localizado no complexo privado da Unidade de Valorização Sustentável (UVS) - Aterro Caieiras-SP, na região noroeste da Grande São Paulo. O empreendimento é especializado na disposição final de resíduos perigosos para

indústrias da Região Metropolitana de São Paulo, do estado e de outras unidades da federação. Durante o período de análise, o Aterro Classe 1 recebeu uma média mensal de 1.500 toneladas de resíduos perigosos. Além de compartilhar a infraestrutura geral da UVS, a área dispõe de setores exclusivos para estocagem temporária de resíduos e um laboratório dedicado ao controle de qualidade e monitoramento dos recebimentos.

A construção da base do aterro (Figuras 2A e 2B) foi executada em conformidade com a NBR 10.157/1987, com o objetivo de criar um sistema de barreira hidráulica dupla: geológica (solos) e geossintética (geomembranas):

Base Compactada: A construção iniciou-se com a regularização do terreno e a compactação de uma camada de solo com 3,0 metros de espessura, posicionada acima do nível freático. Sobre esta, foi aplicada uma camada de argila local com 0,60 m de espessura, dividida em subcamadas de 0,20 m, para otimizar o adensamento. O grau de compactação alcançado resultou em um coeficiente de permeabilidade inferior ao requisito normativo: 5×10^{-5} cm/s (Cepollina, 2016).

Sistema Geossintético: Acima desta camada de solo compactado, foi instalado um sistema de impermeabilização composto por um Geocomposto bentonítico, uma Geomembrana de PEAD (Polietileno de Alta Densidade) de 2,0 mm texturizada e outra de 1,5 mm. Entre as geomembranas, foi inserida uma Georrede com a função de drenar eventuais percolados para o dreno testemunho, garantindo a detecção de possíveis falhas no sistema de impermeabilização. (Cepollina, 2016).

Para proteção da última Geomembrana, foi instalada uma manta de Geotêxtil não tecido de 600 g/m² com alta resistência à tração (31 kN/m) (Figura 2C). Acima, uma camada de 40 cm de brita nº 4, com função drenante, foi sobreposta para coletar possíveis percolados. Finalizando o sistema, outro geotêxtil mais leve (150 g/m²) e resistência à tração de 7 kN/m foi colocado para evitar a migração de finos da brita para as camadas superiores (Figura 2E).

Ainda na Figura 2E observa-se que no talude foi implantado uma proteção para a geomembrana com pneus preenchidos com solo, instalada sobre o geotêxtil de 600 g/m². Este é um uso interessante para pneus inservíveis, empregados na função de proteção mecânica e amortecimento de eventuais impactos físicos nos taludes. A impermeabilização foi realizada na base e taludes das células do aterro, os geossintéticos foram soldados por meio de termofusão e as geomembranas ancoradas em trincheiras perimetrais ao longo das bordas das células do aterro, conforme projeto executivo (Cepollina, 2016).

O dreno testemunho (Figura 2D) é composto pelos sistemas: Geotêxtil, Geomembrana de PEAD, Georrede e Geocomposto bentonítico. A Georrede possui espessura de 5 mm e transmissividade de $1,80 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (gradiente hidráulico 1 e carga 200 kPa) sendo aplicada somente na parte superior do dreno. A função do dreno testemunho é escoar, por gravidade, o fluxo que eventualmente possa vazar do aterro, conduzindo-o por uma camada de brita (nº 1) e uma tubulação de PEAD perfurada, com 160 mm de diâmetro, até o sistema de bombeamento. Esse sistema é composto por tubulação de PEAD com 355 mm de diâmetro, instalada paralelamente ao talude, com a finalidade de detecção de vazamentos. O dreno testemunho é executado abaixo do bombeamento de percolado do aterro, o que permite o recebimento e acúmulo de líquidos de vazamentos, sua detecção e captação (Cepollina, 2016).

O sistema de coleta de líquidos percolados (Figura 2E) foi instalado acima da Geomembrana de PEAD de 1,5 mm. Os elementos deste sistema em ordem descendente são:

- (i) Geotêxtil não tecido de 150 g/m^2 , instalado acima da camada de brita com a função de filtrar o percolado antes de atingir a camada drenante,
- (ii) Camada drenante de brita (nº 4), com espessura de 0,40 m, distribuída em toda a base do aterro, para captar os líquidos percolados e direcionar para a tubulação de coleta de percolado e para o poço de bombeamento (Figura 2D),
- (iii) Dreno vertical executado com tubulação de concreto armado perfurada, desde a base e envolvidos com rachão contidos pelo uso de tela soldada, com a função de aumentar a eficiência da coleta de líquidos percolados (Figura D) e
- (iv) Poço de bombeamento instalado no ponto de menor cota, para o recalque do percolado por bomba submersível, executado em tubo de concreto armado perfurado de diâmetro de 1,0 m, apoiado em laje para proteção mecânica da geomembrana (Cepollina, 2016).

Após a finalização de cada célula (fase) de operação do aterro foi executada uma camada de cobertura intermediária com espessura de 0,50 m de solo argiloso local compactado. A cobertura intermediária tem a função de minimizar a infiltração da água de chuva e da geração de percolado. As frentes de operação no interior da vala também são cobertas para evitar a infiltração de águas pluviais no maciço (resíduos depositados nas células do aterro), sendo utilizadas lonas impermeáveis de dimensões da ordem de 20 m por 20 m ou superiores, com sistema de velcro nas laterais e ancoradas por sacos de areia.

O sistema de cobertura final (Figura 2F) é composto pelos elementos na ordem descendente:

- (i) Solo de argila local de proteção com 0,40 m de espessura, com a função de proteção do Geocomposto drenante e da Geomembrana e preparo do plantio de grama,
- (ii) Geocomposto drenante, constituído por Geogrelha (5,0 mm) e geotêxtil não tecido (300 g/m²), com a função de captar e drenar a água pluvial infiltrada pelo solo de topo e o Geotêxtil com a função de proteger a geomembrana de PEAD de danos físicos e prevenir a colmatção da georrede,
- (iii) Geomembrana de PEAD de 1,5 mm texturizada nas duas faces, com a função de evitar a infiltração de água no maciço de resíduos, instalada sobre o Geocomposto bentonítico,
- (iv) Geocomposto bentonítico (GCL), composto por uma camada de bentonita sódica entre dois Geotêxteis não tecido (superior) e tecido (inferior), com função de barreira hidráulica secundária e
- (v) Solo de regularização, camada compactada com espessura média de 0,40 m, executada sobre a superfície final da camada de resíduo (Cepollina, 2016).

Os elementos de drenagem das águas pluviais do Aterro Classe 1, são constituídos por canaletas triangulares e trapezoidais, instaladas nas bermas de resíduos, no pé dos taludes de alteamento, com função de coletar as vazões provenientes dos taludes das células e encaminhá-las para as descidas hidráulicas em colchão reno. Adicionalmente, canaletas triangulares revestidas com grama são implantadas nas plataformas superiores do alteamento, sendo executadas no selo de solo de cobertura com 2,50 m de largura e 0,50 m de profundidade (Cepollina, 2016).

Figura 2

Elementos construtivos do Aterro Classe 1 da Essencis, UVS-Caieiras.

A - Sistema de impermeabilização de base do aterro. **B** - Galpão de cobertura do aterro.

C - Impermeabilização da base e talude no aterro. **D** - Instalação do dreno testemunho no

aterro. **E** - Instalação de pneus no talude no aterro. **F** - Sistema de cobertura final do aterro.



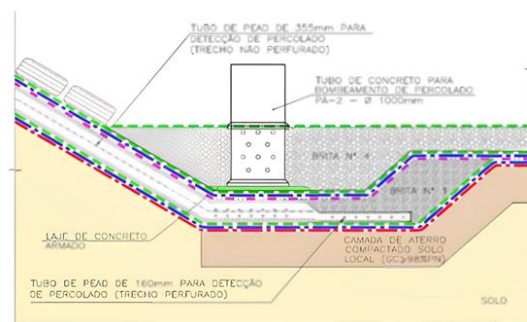
A



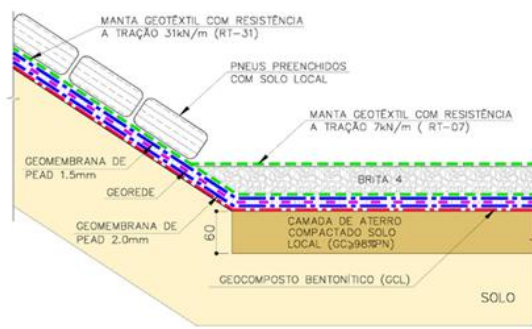
B



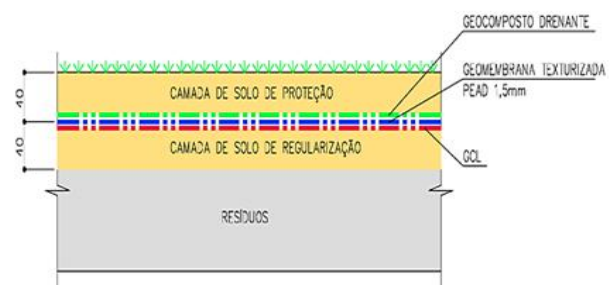
C



D



E



F

Fonte: A e B - Essencis (2016). C, D, E e F - Cepollina (2016).

A sequência do protocolo para o recebimento e disposição final de resíduos perigosos no Aterro Classe 1 é apresentada a seguir:

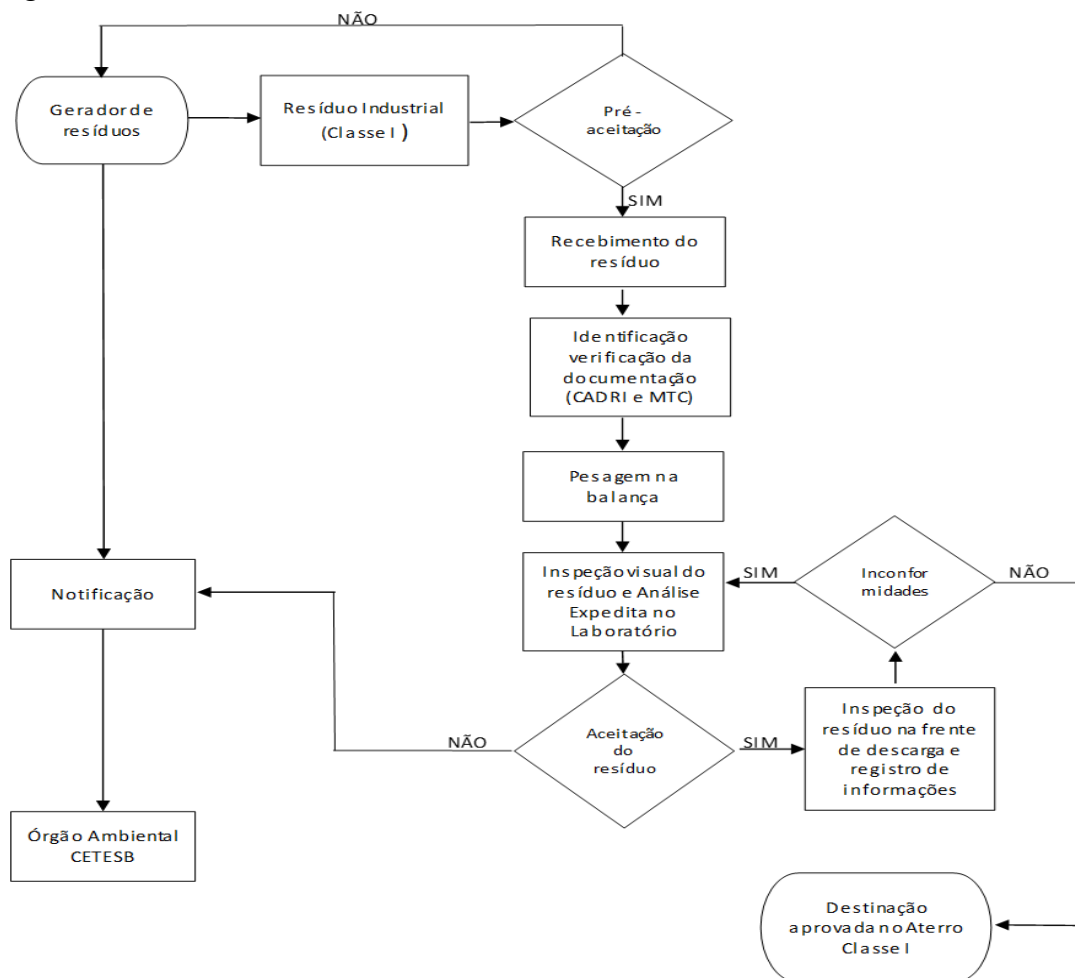
- (i) A pré-aceitação dos resíduos consiste na obtenção de informações detalhadas sobre sua natureza e composição, em conformidade com os requisitos das normas técnicas NBR 10.004:1 e NBR 10.004:2/2024, visando garantir a correta caracterização e disposição final deles,
- (ii) O processo de recebimento inicia-se com a identificação e autorização de acesso dos caminhões, seguindo-se a pesagem em duas etapas: entrada e saída. A documentação exigida, incluindo o CADRI e o MTR, é conferida e registrada. Após a pesagem, é emitido um ticket, que serve como comprovante e registro permanente da operação. Adicionalmente, são realizadas inspeções nas condições sanitárias dos veículos e nos equipamentos de proteção individual dos operadores. Por fim, a carga é direcionada para a estação de amostragem (laboratório) para análise,
- (iii) Após a pesagem, uma amostra do resíduo é coletada e encaminhada ao laboratório para análise expedita. A finalidade desta análise é confirmar as informações declaradas no CADRI e no MTR. A liberação da carga para descarte no aterro está condicionada à conformidade dos resultados da análise com as informações declaradas. Em caso de não conformidade, a carga é retida e o gerador do resíduo, assim como o órgão ambiental competente, são imediatamente notificados,
- (iv) A amostragem dos resíduos é realizada conforme a norma NBR 10007/2004. A análise expedita abrange parâmetros como pH, líquidos livres e reatividade, enquanto a análise completa avalia uma ampla gama de parâmetros físico-químicos e elementos (Metais: arsênio, cádmio, selênio, bário, cromo (total e hexavalente), berílio, níquel, antimônio, chumbo, mercúrio. Compostos orgânicos voláteis (COVs): benzeno, tetracloreto de carbono, tetracloroeteno, tricloroeteno. Cianetos: cianeto. Parâmetros físico-químicos: massa bruta, pH, aspecto físico, odor, líquidos livres, teor de umidade, sólidos totais, fixos e voláteis).

A cada carga é realizada uma análise expedita, e análises completas são realizadas periodicamente ou quando se atinge metade da quantidade contratada. As amostras são armazenadas por 12 meses. Em caso de não conformidade, o gerador e o órgão ambiental são notificados, e a carga é rejeitada se não possuir documentação válida ou apresentar características incompatíveis com a destinação.

Na disposição dos resíduos, as cargas que são autorizadas pelo laboratório seguem para a frente de descarga no aterro, onde o resíduo descarregado é inspecionado pelo encarregado operacional. Este local de deposição é identificado e registrado por meio de GPS que afere seu Geoposicionamento e cota altimétrica em planilha de cadastro, juntamente com os seguintes dados complementares: data da deposição, quantidade de resíduos aterrada e módulo da célula de descarregamento do aterro. Todas estas informações fazem parte do processo de rastreabilidade do resíduo no aterro. O fluxograma do processo de recebimento e operação de resíduos perigosos no Aterro Classe 1 são apresentadas na Figura 3.

Figura 3

Fluxograma de recebimento de resíduos no Aterro Classe 1 - Essencis, UVS-Caieiras.

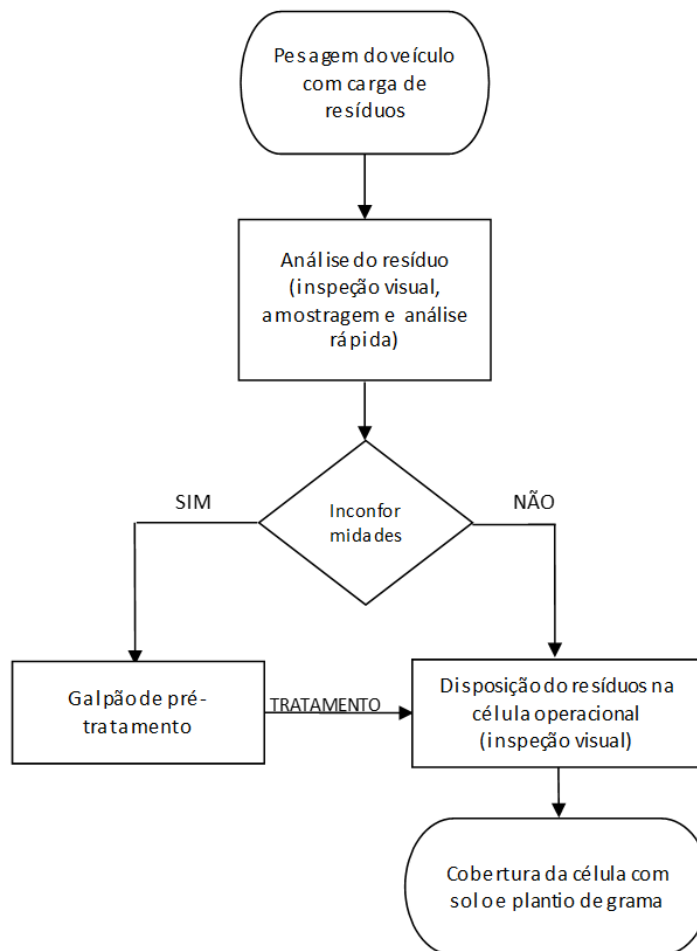


Fonte: Cepollina (2016).

A Figura 4 apresenta o fluxo operacional básico do gerenciamento de resíduos perigosos no aterro. Inicialmente, o veículo é pesado com a carga, seguido por uma inspeção visual e coleta de amostras para análise. Nessa etapa, são verificadas possíveis inconformidades. Quando identificadas irregularidades, a carga é direcionada ao galpão de pré-tratamento. Após essa etapa, o resíduo é encaminhado para disposição na célula operacional, sendo posteriormente coberto com solo e submetido ao plantio de grama, como etapa final de encerramento. No caso de aceitação do resíduo após a análise, este é diretamente destinado às células de disposição.

Figura 4.

Fluxograma operacional básico no Aterro Classe 1 - Essencis, UVS-Caieiras.



Fonte: Cepollina (2016).

4.1. Potencial e Desafios da Mineração de Aterros (*Landfill Mining*)

O *Landfill Mining* (Mineração de Aterros) emerge como uma alternativa promissora para a gestão de resíduos, visando a recuperação de recursos e a mitigação dos impactos ambientais. Esta prática possibilita a recuperação de materiais valorizáveis e a geração de energia a partir do resíduo historicamente disposto, contribuindo significativamente para a reabilitação de áreas degradadas e a extinção de passivos ambientais (Laner et al. 2019).

Apesar de seu potencial, o desenvolvimento do *Landfill Mining* é cercado por desafios significativos. Segundo Krook et al. (2012), os principais obstáculos envolvem a necessidade de inovação tecnológica, a redução de custos para a realização dos projetos e a padronização de estruturas para a avaliação de desempenho.

Frändegård et al. (2013) identificam quatro incertezas cruciais que desafiam a concepção de projetos viáveis:

- (i) Heterogeneidade dos resíduos: A composição diversa e imprevisível do material escavado.
- (ii) Eficiência das tecnologias de processamento: A capacidade de separar e tratar o resíduo recuperado de forma eficaz.
- (iii) Instabilidade do mercado: A flutuação de preços para os materiais recuperados.
- (iv) Riscos ambientais e de saúde: Perigos associados à escavação e manuseio de resíduos antigos, como evidenciado por Einhaupl et al. (2021) e Goli e Singh (2023).

A singularidade de cada aterro é um fator determinante, com a idade, o tipo de resíduo e a localização influenciando diretamente o potencial de recuperação e a viabilidade econômica e ambiental. A avaliação detalhada de cada caso é, portanto, fundamental para a definição de estratégias de mineração adequadas (Bockreis e Knapp, 2011; Winterstetter et al. 2015). Estudos de caso ilustram esse potencial:

- (i) Recuperação Energética (Aterro Remo, Bélgica): A análise do Aterro Remo indicou a recuperação energética como a rota mais adequada, dada a alta contaminação do material por plásticos, papel/papelão, têxteis e madeira, que o tornam inviável para reciclagem direta. O potencial energético desses resíduos foi estimado entre 18 e 23 MJ/kg. Adicionalmente, o estudo identificou altas concentrações de metais pesados

(Cu, Cr, Ni e Zn) em resíduos industriais finos, abrindo perspectivas para a recuperação e comercialização desses elementos (Quaghebeur et al. 2013).

- (ii) Recuperação de Metais Valiosos (Europa): Análises realizadas em quatro aterros europeus revelaram a presença significativa de metais de alto valor, como paládio, neodímio, cobre e alumínio, em profundidades de até 30 metros, com um potencial econômico agregado estimado em 360 milhões de euros (Greedy, 2016).

4.2. Viabilidade Econômica da Mineração de Aterros (*Landfill Mining*)

A viabilidade econômica do *Landfill Mining* permanece um fator crítico e altamente restritivo. Estudos europeus indicam uma grande variação de custos, que podem atingir de 127 a 139 euros por tonelada de resíduo escavado. Essa disparidade reflete uma baixa rentabilidade, com apenas 20% dos projetos avaliados demonstrando retorno financeiro positivo (Esguerra et al. 2021). Diante deste cenário, a implementação de projetos em Aterros Classe 1 exige uma análise de risco minuciosa que otimize os benefícios e minimize os riscos técnicos, econômicos e ambientais (Esguerra et al. 2021).

O potencial de geração de receita em projetos de *Landfill Mining* aplicados a resíduos perigosos é limitado pelos altos custos operacionais e pelas incertezas inerentes ao processo, comprometendo diretamente o equilíbrio financeiro do projeto (Laner et al., 2019). Os principais fatores de custo e risco incluem:

- (i) Estudos Iniciais e Caracterização (alto investimento prévio): A necessidade de realizar estudos aprofundados (geotécnicos, químicos e de mercado) antes do início da operação representa um investimento inicial substancial. É fundamental obter uma caracterização precisa dos contaminantes e do seu comportamento na matriz do aterro para dimensionar os processos de tratamento e mitigar riscos (Frändegård et al. 2013),
- (ii) Custos de Pré-Tratamento e Extração (complexidade operacional): O material em Aterros Classe 1 é notoriamente heterogêneo e potencialmente reativo. Isso faz com que os custos de extração, separação (devido à compactação) e pré-tratamento, como descontaminação ou estabilização, sejam significativamente mais altos do que os observados em aterros de resíduos sólidos urbanos (Jain et al. 2023),

- (iii) Mercado Volátil e Custos de Rejeitos (risco financeiro): A rentabilidade depende diretamente da cotação de mercado dos materiais recuperáveis (metais, agregados). No entanto, a incerteza é agravada pelo fato de que o custo de destinação final do rejeito (o material escavado que não é recuperável) pode facilmente superar o valor total dos materiais comercializáveis. Essa volatilidade exige o desenvolvimento de uma estratégia de gestão de risco mais robusta e complexa (Esguerra et al. 2021).

4.3. Riscos Ambientais e Ocupacionais da Mineração de Aterros (*Landfill Mining*)

A escavação em Aterros Classe 1 expõe riscos ambientais e de segurança críticos que devem ser abordados e mitigados por meio de um planejamento rigoroso. A operação de *Landfill Mining* desestabiliza o maciço de resíduos, exigindo medidas de controle específicas:

- (i) Monitoramento e Controle de Contaminantes: A remoção do material pode levar à liberação súbita de gases tóxicos, como Compostos Orgânicos Voláteis (COVs). Além disso, há risco de mobilização de contaminantes solúveis (por exemplo, metais pesados) devido ao aumento da infiltração de água de chuva na área escavada (Bockreis e Knapp, 2011). Por isso, o monitoramento constante da qualidade do solo e das águas subterrâneas é essencial (Barros, 2012),
- (ii) Controle de Percolado: O processo de mineração altera drasticamente o balanço hídrico do aterro. Isso pode elevar o volume e a carga poluidora do percolado gerado, potencialmente sobrecarregando o sistema de tratamento existente, que já opera sob padrões rigorosos (Cepollina, 2016),
- (iii) Segurança Operacional e Geotécnica: O monitoramento geotécnico da estabilidade dos taludes torna-se mais crítico durante a escavação. A segurança dos trabalhadores exige o uso de EPIs adequados à exposição de agentes perigosos, devendo-se atender rigorosamente às diretrizes de segurança para o manuseio de químicos (OIT, 2014).

Quanto aos aspectos positivos do *Landfill Mining*, Johansson, Krook e Eklund (2017) realizaram uma análise abrangente e identificaram diversas vantagens:

- (i) Recuperação de Materiais: A prática disponibiliza grandes quantidades de minerais em alta concentração, possibilitando a reciclagem e reutilização de materiais,
- (ii) Mitigação da Extração Primária: A recuperação de recursos reduz a necessidade de novas extrações de matérias-primas virgens, contribuindo para a remediação ambiental e a sustentabilidade,
- (iii) Recuperação de Áreas: A escavação e o tratamento dos resíduos permitem a recuperação de áreas de aterro, gerando novos espaços para outras finalidades (Johansson, Krook e Eklund, 2017).

4.4. Pesquisas Futuras em Mineração de Aterros (*Landfill Mining*)

Para impulsionar a aplicação do *Landfill Mining* em Aterros Classe 1, são recomendadas investigações futuras alinhadas às tendências globais de gerenciamento sustentável de resíduos (Krook et al. 2012):

- (i) Desenvolvimento de Modelo de Viabilidade Específico: É essencial conceber um Modelo de Avaliação de Risco e Economia direcionado a Aterros Classe 1. Este modelo deve obrigatoriamente integrar os altos custos de tratamento do rejeito perigoso (incineração, coprocessamento ou estabilização) com a receita potencial advinda dos materiais recuperáveis. A quantificação de recursos e reservas deve seguir princípios robustos e padronizados (Winterstetter et al. 2015),
- (ii) Estudos de Caracterização em Escala-Piloto: Promover estudos de caracterização química e física em escala-piloto é fundamental. Tais estudos devem empregar tecnologias de triagem avançadas (como separação balística ou sensores ópticos) que sejam adaptadas para lidar com a matriz complexa e potencialmente corrosiva de um Aterro Classe 1,
- (iii) Análise de Redução de Passivo Ambiental: É necessário quantificar a redução do passivo ambiental resultante de um projeto de *Landfill Mining* por meio de modelagem. A quantificação deve englobar a área de terra recuperada, o volume de lixiviado gerado evitado e a redução das emissões gasosas,

- (iv) Investigação da Análise Regulatória e Institucional: Investigações futuras devem focar na capacidade institucional e nas barreiras regulatórias para a adoção do *Landfill Mining* de resíduos perigosos no contexto da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Brasil, 2010). O objetivo é garantir que a recuperação de recursos não comprometa a responsabilidade legal do gerador sobre o rejeito final resultante do processo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os procedimentos de implantação, operação, controle e monitoramento do Aterro Classe 1 na UVS - Aterro Caieiras foram avaliados, demonstrando conformidade com as exigências normativas, notavelmente a NBR 10.157/1987. Esta aderência garante a segurança operacional e a proteção ambiental, pilares de uma gestão aprimorada que, alinhada à PNRS, contribui para a descarbonização e a mitigação dos impactos das mudanças climáticas por meio da otimização da disposição e da captura de gases de efeito estufa.

O *Landfill Mining* emerge como uma abordagem inovadora que complementa a hierarquia de gestão de resíduos (redução, reutilização e reciclagem). Ao transformar aterros em reservas de recursos secundários estratégicos, essa técnica oferece uma oportunidade para o gerenciamento de resíduos já dispostos, diminuindo a pressão sobre os aterros e auxiliando no alcance dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Análises dos registros de entrada no Aterro Caieiras indicam a presença de quantidades significativas de resíduos metálicos valiosos (como alumínio e cobre). A recuperação desses materiais possui alto potencial de valorização econômica e ambiental, contribuindo para a redução do consumo de energia e água e a diminuição da pressão sobre os recursos naturais.

Apesar do potencial, a implementação de projetos de *Landfill Mining*, especialmente em Aterros Classe 1 (como o estudo de caso avaliado), exige cautela. É fundamental realizar estudos de viabilidade técnico-econômica detalhados para avaliar a rentabilidade e a sustentabilidade da iniciativa, dada a complexidade do tratamento do rejeito perigoso remanescente. Para a concretização desta prática, são indispensáveis: o desenvolvimento de tecnologias específicas para lidar com a heterogeneidade e a periculosidade dos materiais e a criação de um marco regulatório adequado que garanta a segurança ambiental e a saúde pública, sem comprometer a responsabilidade legal do gerador.

No estudo de caso avaliado, é fundamental que se realize o dimensionamento e a caracterização físico-química rigorosa dos resíduos dispostos no aterro. Essa precisão é crítica para determinar o potencial de recuperação de recursos e, conseqüentemente, garantir a viabilidade técnico-econômica e ambiental de uma potencial aplicação do *Landfill Mining*.

O potencial de recuperação de materiais valiosos em Aterros Perigosos (Classe 1) torna o *Landfill Mining* uma promissora alternativa para a obtenção de recursos estratégicos. A adoção de políticas públicas que incentivem essa prática, por meio de benefícios fiscais e financeiros, é importante para promover a economia circular no Brasil. Ao aproveitar a infraestrutura existente, o *Landfill Mining* gera benefícios socioeconômicos (como a criação de empregos) e reforça o papel dos Aterros na sustentabilidade ambiental e na exploração de recursos secundários.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos - ABRETE. (2006). *Perfil do setor de tratamento de resíduos e serviços ambientais*. ABRETE.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (1987). *NBR 10157 - Aterros de resíduos perigosos - Critérios para projeto, construção e operação*. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (1992). *NBR 12235 - Armazenamento de resíduos sólidos perigosos*. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2024). *Resíduos sólidos - Classificação - Parte 1: Requisitos de classificação* (ABNT NBR 10004-1). ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2024). *Resíduos sólidos - Classificação - Parte 2: Sistema Geral de Classificação de Resíduos (SGCR)* (ABNT NBR 10004-2). ABNT.

Barros, R. M. (2013). *Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade*. Interciência.

Barros, R. M. (2014). Resíduos sólidos. In L. A. H. Nogueira & R. S. Capaz (Eds.), *Ciências ambientais para engenharia* (pp. 385-412). Elsevier.

Barros, R. T. de V. (2012). *Elementos de gestão de resíduos sólidos*. Tessitura.

Bockreis, A., & Knapp, J. (2011). Landfill Mining - Deponien als Rohstoffquelle. *Österr Wasser- und Abfallw*, 63, 70-75. <https://doi.org/10.1007/s00506-010-0275-1>

Brasil. (2010). Lei nº 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. *Diário*



Oficial da República Federativa do Brasil. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm

Brasil. Ministério do Meio Ambiente/Secretaria de Qualidade Ambiental. (2022). *Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares*. MMA. <https://portal-api.sinir.gov.br/wp-content/uploads/2022/07/Planares-B.pdf>

Cepollina. (2016). *EIA/Rima: ampliação da Central de Tratamento e Valorização Ambiental - CTVA Caieiras*. Cepollina/Ecodue/Essencis. <https://cetesb.sp.gov.br/licenciamentoambiental/eia-rima/>

Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. (2002). Resolução nº 313 de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. *Diário Oficial da União*. <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=263>

Cossu, R., & Williams, I. D. (2015). Urban mining: Concepts, terminology, challenges. *Waste Management*, 45, 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.040>

Einhaupl, P., Van Acker, K., Peremans, H., & Van Passel, S. (2021). The conceptualization of societal impacts of landfill mining - A system dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*, 296, 126351. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126351>

Esguerra, J. L., Laner, D., Svensson, N., & Krook, J. (2021). Landfill mining in Europe: Assessing the economic potential of value creation from generated combustibles and fines residue. *Waste Management*, 126, 221-230. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.013>

Eurostat. (2023). *Statistic Explained - Hazardous waste generation*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics

Frändegård, P., Krook, J., Svensson, N., & Eklund, M. (2013). A novel approach for environmental evaluation of landfill mining. *Journal of Cleaner Production*, 55, 24-34. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.045>

Fricke, K. (2009). Urban Mining – nur ein Modebegriff? *eJournal Gesamtheit*, 41(10), 489-489. <https://www.esv-elibrary.de/journal/article/99.160005/mua.2009.10>

Goli, V. S. N. S., & Singh, D. N. (2023). Valorization of landfill mined plastic waste and soil-like fractions in polymer composites - A comprehensive solution for sustainable landfill mining. *Journal of Cleaner Production*, 420, 138349. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138349>

Greedy, D. (2016). Landfilling and landfill mining. *Waste Management & Research*, 34(1), 1-2. <https://doi.org/10.1177/0734242X15617878>

Jain, M., Kumar, A., & Kumar, A. (2023). Landfill mining: A review on material recovery and its utilization challenges. *Process Safety and Environmental Protection*, 169, 948-958. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.049>



Johansson, N., Krook, J., & Eklund, M. (2017). The institutional capacity for a resource transitions - A critical review of Swedish governmental commissions on landfill mining. *Environmental Science & Policy*, 70, 46-53. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.01.005>

Krook, J., & Baas, L. (2013). Getting serious about mining the technosphere: a review of recent landfill mining and urban mining research. *Journal of Cleaner Production*, 55, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.043>

Krook, J., Svensson, N., & Eklund, M. (2012). Landfill mining: A critical review of two decades of research. *Waste Management*, 32, 513–520. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.015>

Laner, D., Esguerra, J. L., Krook, J., Horttanainen, M., Kriipsalu, M., Rosendal, R. M., & Stanisavljevic, N. (2019). Systematic assessment of critical factors for the economic performance of landfill mining in Europe: What drives the economy of landfill mining? *Waste Management*, 95, 674-686. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.007>

Le-Khac, U. N., Bolton, M., Boxall, N. J., Wallace, S. M. N., & George, Y. (2024). Living review framework for better policy design and management of hazardous waste in Australia. *Science of The Total Environment*, 924, 171556. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171556>

Minelgaité, A., & Liobikienė, G. (2019). Waste problem in European Union and its influence on waste management behaviours. *Science of The Total Environment*, 667, 86-93. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.313>

Organização Internacional do Trabalho - OIT. (2014). *A segurança e a saúde na utilização de produtos químicos no trabalho* [Dia mundial da segurança e saúde no trabalho]. file:///C:/Users/User/Downloads/wcms_666011.pdf

Quaghebeur, M., Laenen, B., Geysen, D., Nielsen, P., Pontikes, Y., Van Gerven, T., & Spooren, J. (2013). Characterization of landfilled materials: screening of the enhanced landfill mining potential. *Journal of Cleaner Production*, 55, 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.06.012>

Rosenfeld, P. E., & Feng, L. G. H. (2011). 12 - Current Practices in Hazardous Waste Treatment and Disposal. In *Risks of Hazardous Wastes* (p. 155-168). William Andrew – Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-7842-7.00012-X>

Zanon, T. V. B. (2016). Fatores e critérios a serem observados na seleção de áreas para aterros sanitários. *Revista Limpeza Pública*, 94, 18-29. http://www.ablp.org.br/wp-content/uploads/2022/07/edicao_0094.pdf