

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE SOLOS DE COBERTURA E DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO ATERRO SANITÁRIO METROPOLITANO OESTE DE CAUCAIA, CEARÁ, BRASIL

* Michael Lima Silva ¹
Gemmelle Oliveira Santos ¹
Roberto Antônio Cordeiro da Silva ²

PHYSICAL CHARACTERIZATION OF COVERAGE SOILS AND SOLID WASTE FROM THE METROPOLITAN LANDFILL WEST OF CAUCAIA, CEARA, BRAZIL

Recibido el 11 de septiembre de 2022. Aceptado el 13 de febrero de 2023

Abstract

The composition of the waste studied, by itself, anticipates that many internal changes will occur within the massifs after the end of the useful life of the landfill studied. In view of this, in this study tests were carried out on the gravimetric composition, apparent loose specific mass and moisture content and volatile solids of the MSW received in two areas (Area 1 and 2) of the Sanitary Landfill of Caucaia, Ceará, Brazil. At the same time, the permeability coefficients of the cover soils were determined, and their compaction and granulometric composition were determined. The research showed that between 2012 and 2021, the landfill received more than 20.5 million tons of MSW, its composition being mostly of easily degradable material, and the apparent specific mass of this material varied between 123.75 and 295.42 kg /m³. In Area 1, the humidity of the landfilled waste ranged from 20.97% to 34.54% and the volatile solids from 9.12% to 31.49%. In Area 2, these values were: humidity (24.25% to 63.13%) and volatile solids (24.36% to 95.44%). These results indicate that the organic matter of waste landfilled in a closed area (Area 1) is practically stabilized, while the waste landfilled in the new operating area (Area 2) showed higher values, showing the potential for degradation and biogas generation. The permeability of the covering soils in Area 1 of the landfill (3.6x10⁻⁴ at 1.0x10⁻³ cm/s) were higher than in Area 2 (1.9x10⁻⁶ at 3.1x10⁻⁵ cm/s), showing that over time, and under the weather, these layers lose their efficiency. In addition, the region's rainfall had a positive influence on the moisture content of the landfilled waste.

Keywords: landfill, municipal solid waste, cover layer.

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, campus Fortaleza, Brasil.

² Universidade Federal do Ceará, Brasil.

* Autor correspondente: Instituto Federal do Ceará. Av. Treze de Maio, 2081 – Benfica, Fortaleza – CE – CEP: 60040-531; Email: contatomichaells@gmail.com

Resumo

A composição dos resíduos estudados, por si só, antecipa que muitas alterações internas ocorrerão dentro dos maciços após o encerramento da vida útil do aterro sanitário estudado. Tendo em vista isso, neste estudo foram realizados ensaios de composição gravimétrica, massa específica aparente solta e teores de umidade e sólidos voláteis dos RSU recebidos em duas áreas (Área 1 e 2) do Aterro Sanitário de Caucaia, Ceará, Brasil. Paralelamente, foram determinados os coeficientes de permeabilidade dos solos de cobertura, e determinada sua compactação e composição granulométrica. A pesquisa mostrou que entre 2012 e 2021, o aterro recebeu mais de 20.5 milhões de toneladas de RSU, sendo sua composição majoritariamente de material facilmente degradável, e a massa específica aparente solta desse material variou entre 123.75 e 295.42 Kg/m³. Na Área 1, a umidade dos resíduos aterrados variou de 20.97% a 34.54% e o sólidos voláteis entre 9.12% e 31.49%. Na Área 2, esses valores foram: umidade (24.25% a 63.13%) e sólidos voláteis (24.36% a 95.44%). Os resultados indicam que a matéria orgânica dos resíduos aterrados numa área encerrada (Área 1) está praticamente estabilizada, ao passo que os resíduos aterrados na nova área em operação (Área 2) apresentaram valores superiores, mostrando o potencial de degradação e geração de biogás. A permeabilidade dos solos de cobertura da Área 1 do aterro (3.6×10^{-4} a 1.0×10^{-3} cm/s) foram maiores do que a Área 2 (1.9×10^{-6} a 3.1×10^{-5} cm/s), mostrando que com o tempo, e sob as intempéries, essas camadas vão perdendo sua eficiência. Ademais, a pluviosidade da região exerceu influência positiva sobre os teores de umidade dos resíduos aterrados.

Palavras-chave: aterro sanitário, resíduos sólidos urbanos, camada de cobertura.

Introdução

A rotina operacional de um aterro sanitário envolve a preparação da célula (limpeza da área, escavação da trincheira, impermeabilização de fundo, instalação dos dispositivos de drenagem para líquidos e gases), recepção dos resíduos, pesagem, despejo na frente de serviço, espalhamento, compactação e cobertura.

A composição dos Resíduos Sólidos Urbanos - RSU, sob influência de condições internas e externas, tem grande impacto sobre as condições de operação, encerramento e reuso das áreas dos aterros sanitários, já que os RSU passam por alterações físicas, químicas e biológicas.

A composição gravimétrica, a massa específica aparente, o teor de umidade e de sólidos voláteis são parâmetros dos RSU que ajudam a entender os processos de degradação e a compor um diagnóstico e prognóstico do desempenho ambiental e geotécnico dos aterros sanitários.

A camada de cobertura, por sua vez, possui importância ambiental e geotécnica já que regula a transferência de massa entre a atmosfera e os resíduos, controla o escoamento e a entrada de água no maciço e evita e/ou minimiza a dispersão das emissões de gases (Cossu, 2019).

O aumento do volume de líquidos dentro dos aterros sanitários reduz a estabilidade geotécnica do local, influencia no ritmo de degradação dos resíduos e na formação de gases e, de acordo com as características de cada aterro, podem sobrecarregar os sistemas de drenagem e tratamento. Por isso, os aterros sanitários precisam de monitoramento geotécnico e ambiental.

O maior aterro sanitário do estado do Ceará tem 123 hectares, localiza-se no município de Caucaia, Região Metropolitana de Fortaleza, e encerrou suas operações no segundo semestre de 2021, quase 30 anos após sua inauguração.

Essa pesquisa foi realizada no último ano de operação do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC) e seus dados servem para elaboração dos planos de recuperação, monitoramento e de uso futuro da área do empreendimento, além de contribuir para a operação da nova área localizada ao lado do ASMOC, que vem recebendo 6000 toneladas por dia de RSU e tem vida útil estimada em 20 anos.

O levantamento quanti-qualitativo dos resíduos recebidos na véspera de encerramento do ASMOC e os ensaios sobre as camadas de cobertura representam um registro histórico que poderá ser utilizado futuramente e constituem um conjunto de informações-chave para o planejamento da ocupação da nova área.

Além desses aspectos, tais variáveis são importantes para o planejamento e desenvolvimento do setor, para a correta estruturação das operações de coleta e transporte, bem como para o estabelecimento de novas infraestruturas de triagem, tratamento, recuperação e outras opções de destinação (ABRELPE, 2020).

Desse modo, o objetivo deste estudo foi caracterizar, do ponto de vista físico, os solos de cobertura e os resíduos sólidos urbanos dispostos no ASMOC. Para os resíduos sólidos foram determinados os volumes e as tipologias do material recebido pelo aterro durante uma década (2012 - 2021), a sua composição gravimétrica e sua massa específica aparente solta (ρ). Além disso, foram determinados os teores de umidade e de sólidos voláteis desses resíduos a fim de avaliar o seu comportamento de degradação.

Nos solos que compõem a camada de cobertura do aterro estudado, foram determinadas a composição granulométrica, compactação proctor normal e o coeficiente de permeabilidade (*in situ* e em laboratório).

Ademais, foram analisados os dados pluviométricos da região na qual o ASMOC está inserido, a fim de verificar possíveis influências desses dados na umidade dos resíduos aterrados.

Metodologia

Local de estudo

O estudo foi realizado no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia, situado na Região Metropolitana de Fortaleza, que dista 30 Km, pelas BR-222 ou BR-020, da cidade de Fortaleza, capital do estado do Ceará, Brasil.

A disposição final dos resíduos sólidos coletados em Fortaleza-CE estava em transição: uma área em encerramento (Área 1) e outra sendo iniciada (Área 2). A Figura 1 mostra o município de Caucaia e a localização da área do aterro.

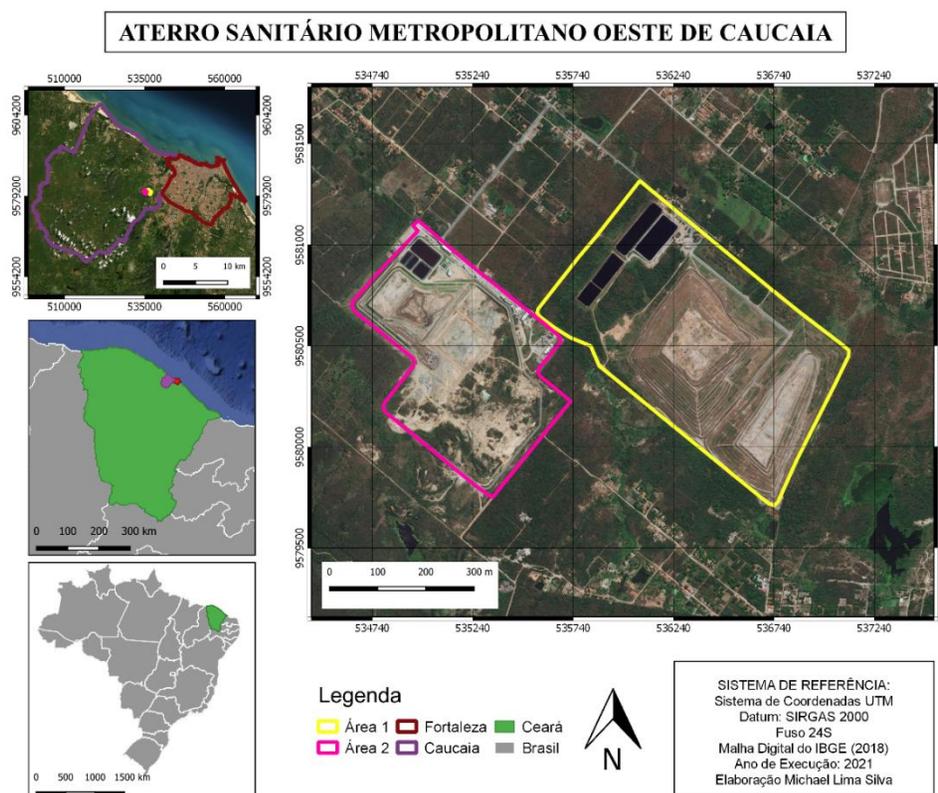


Figura 1. Mapa de localização das áreas de estudo (2021).

Apesar de contíguas, as áreas comportam aterros sanitários com tecnologias bem diferentes: a Área 2 conta com impermeabilização de fundo de geomembrana de PEAD, pós-tratamento dos lixiviados, inclusive com uma planta piloto de osmose reversa, e implantação da rede de aproveitamento do gás metano desde a fundação de cada célula. A Área 1 utilizou apenas o solo

local na impermeabilização de fundo, seus lixiviados eram tratados em lagoas de estabilização e há pouco tempo vinha sendo perfurada para instalação dos poços de gás (adequados ao aproveitamento).

Determinação da quantidade e tipologia dos resíduos

Para conhecer a origem dos resíduos encaminhados ao aterro, foram levantadas informações junto ao setor de monitoramento da ACFOR (Autarquia de Regulação, Fiscalização e Controle dos Serviços Públicos de Saneamento Ambiental de Fortaleza), com dados das quantidades/pesagens e das tipologias dos RSU recebidos no ASMOC entre 2012 e 2021.

Determinação da composição gravimétrica dos resíduos

As amostras de resíduos utilizadas para a determinação da composição gravimétrica foram coletadas após a chegada dos caminhões ao aterro sanitário. O material analisado foi os RSU oriundos dos três tipos de veículos utilizados na coleta de Fortaleza. O resíduo domiciliar é coletado por caminhões compactadores, as carretas transportam os resíduos de uma estação de transbordo para o aterro sanitário e as caçambas basculantes coletam resíduos de limpeza urbana.

O procedimento de obtenção das amostras de cada veículo seguiu as recomendações da CETESB (1990) e do CEMPRE (2018). Dessa forma, cada caminhão foi descarregado no pátio da frente de operação do aterro, onde cada pilha de resíduos foi dividida em quatro partes iguais (os quartis), sendo tomados dois quartis opostos entre si, descartando-se os dois restantes. As partes previamente separadas foram novamente misturadas e o processo de quarteamento foi repetido até que se obtivesse o peso final desejado, que neste caso foi de 200 Kg para cada veículo. Foram selecionadas duas amostras de cada veículo.

Cada amostra foi disposta sobre uma lona, onde houve a triagem desse material, separando-se os resíduos dos grupos desejados. Após esse processo de separação, pesou-se cada classe obtida e calculou-se a porcentagem de cada uma. Como o trabalho de campo ocorreu em plena pandemia, buscou-se abreviar a manipulação dos resíduos, determinando apenas 03 grupos de materiais, genericamente chamados:

- Grupo 1: resíduos degradáveis (restos de alimentos, papel, papelão, podas e resíduos de jardim).
- Grupo 2: resíduos dificilmente ou não degradáveis (vidros, plásticos e metais).
- Grupo 3: rejeitos (entulho e demais itens não classificados anteriormente), Figura 2.



Figura 2. Realização do quarteamento para o ensaio de composição gravimétrica (2021).

Determinação da massa específica aparente solta dos resíduos (ρ)

Foram extraídas 04 amostras de cada veículo, totalizando 24 amostras. Os materiais, ainda misturados, foram colocados em tambores de 100 litros (0.1m^3) e imediatamente pesados em uma balança eletrônica de plataforma sem compactação. A (ρ) foi expressa em Kg/m^3 e a metodologia adotada foi a mesma preconizada pela Cempre (2018).

Determinação dos teores de umidade e sólidos voláteis

Foram coletadas e analisadas 04 amostras de resíduos domiciliares *in natura* de veículos compactadores recepcionadas na frente de transbordo da Área 2. Para a coleta das amostras de resíduos aterrados, foram realizadas perfurações nas células das duas áreas. Na Área 1, foram perfurados dois pontos em três diferentes profundidades: 4, 8 e 12 metros, em março de 2021.

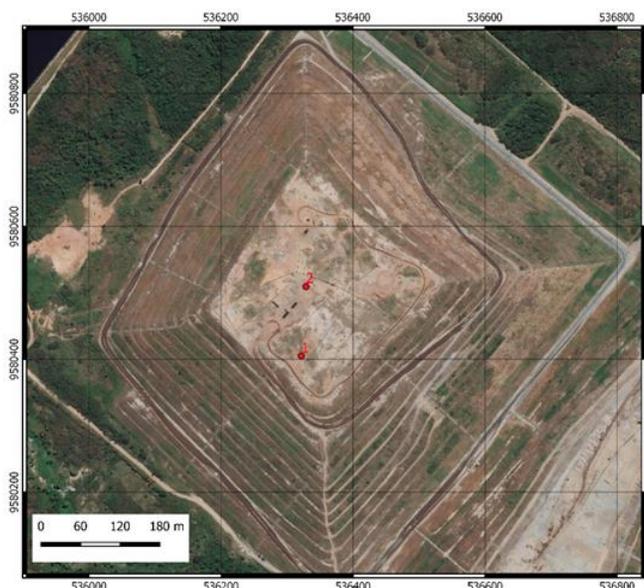


Figura 3. Pontos de coleta de resíduos aterrados na Área 1 (2021).

Na Área 2, os furos foram realizados em dois momentos. Numa primeira campanha, realizada entre abril e julho de 2021, foram coletadas 16 amostras (ponto 3 ao ponto 18) com profundidade de 4 metros. Numa segunda campanha (abril a junho de 2022), foram amostrados mais 05 pontos (ponto 19 ao ponto 23) em profundidades de 4, 8 e 12 metros e em diferentes células da Área 2.

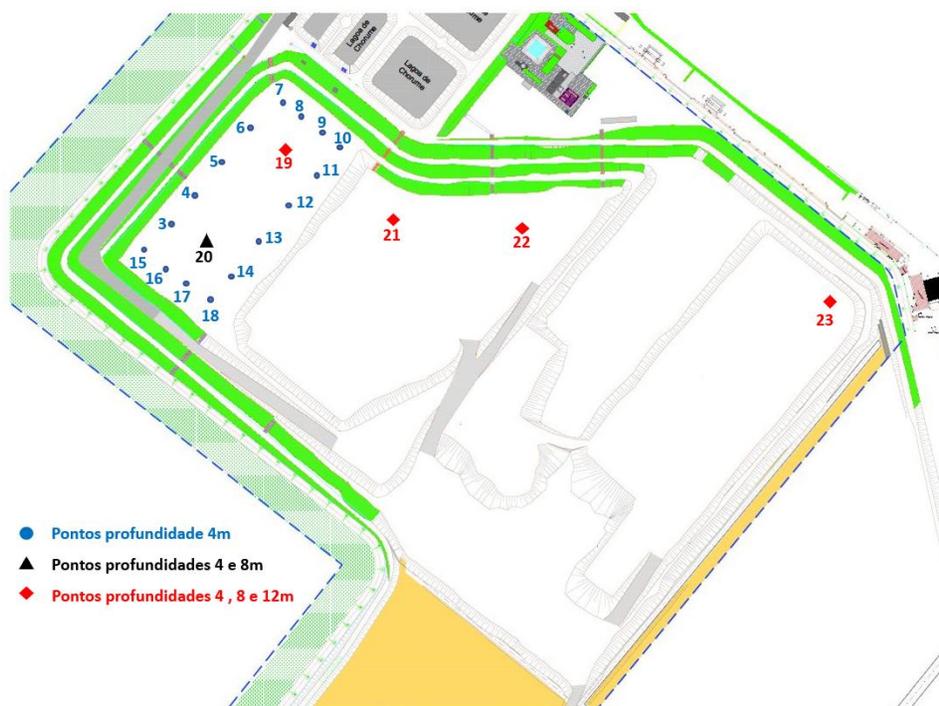


Figura 4. Pontos de coleta de resíduos aterrados na Área 2 (2022).

Os 16 pontos da primeira campanha se concentraram em uma célula recém-concluída, e a escolha da profundidade de 4m foi escolhida a fim de se traçar um perfil horizontal dos parâmetros analisados (umidade e sólidos voláteis).

Durante a segunda campanha, as condições operacionais e o alteamento do novo aterro sanitário permitiam realizar uma maior amostragem, inclusive com a exploração de mais profundidades. Diferentemente da localização dos pontos da primeira campanha (mais próximos), durante a segunda campanha os pontos ficaram mais esparsos, pois, com isso, buscou-se coletar amostras de resíduos em diferentes idades de aterramento, de forma a atender também as demandas da empresa que explora o gás.

Para a perfuração dos pontos, foram utilizados dois tipos de máquinas: uma perfuratriz (A) para as coletas em maiores profundidades (4, 8 e 12 m) e uma retroescavadeira (B) para as coletas mais rasas (4m), conforme mostra a Figura 5 (equipamentos do próprio aterro).



Figura 5. Máquinas utilizadas nas coletas das amostras.

Os teores de umidade foram determinados no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), Universidade Federal do Ceará (UFC). Em cada ponto e profundidade amostrada, foram selecionadas amostras de 30g, que foram levadas à estufa a 60°C durante 48h. Todas as determinações de umidade foram feitas em duplicata, e o método empregado foi o da base úmida (Aires, 2013). A determinação do teor de sólidos voláteis foi executada conforme a norma WHO (1979), com amostras 5g previamente secas na estufa. Cada amostra ficou durante 2 horas dentro do forno mufla com temperatura ajustada a 550°C.

Determinação dos coeficientes de permeabilidade à água dos solos de cobertura do aterro

Em janeiro de 2021 foram coletadas oito amostras de solos (quatro na Área 1 e outras quatro na Área 2). A coleta dessas amostras foi realizado por meio do cravamento de um cilindro de ferro sobre a camada de cobertura, onde se extraíram as amostras indeformadas de solo que posteriormente foram submetidas ao ensaio de permeabilidade à água de carga variável em laboratório.

Em fevereiro de 2021 foram realizados oito ensaios de infiltração *in situ*, pelo método dos anéis concêntricos, sendo quatro ensaios sobre a Área 1 e quatro sobre a Área 2, conforme Bernardo *et al.* (2006). A fim de explorar outros parâmetros dos solos que compõem as camadas de cobertura, foi realizada análise granulométrica conforme Nbr 7181 (ABNT, 2016) e ensaio de compactação conforme Nbr 7182 (ABNT, 2016).

Resultados

Quantidade e tipologias dos resíduos

Entre 2012 e 2021 (última década de funcionamento do ASMOC) foram recebidas mais de 20,5 milhões de toneladas de RSU, Tabela 1, ficando o maior quantitativo registrado em 2014 (10.8% do total), e o menor em 2017 (7.9%), Figura 3.

A média geral de recebimento de RSU apontou para 5 642.87 toneladas por dia. Ao longo do período analisado, os resíduos provenientes da coleta domiciliar de Fortaleza-CE representaram 32.6% do acumulado, seguidos pelos resíduos das coletas especiais realizadas nos “pontos de lixo” (26.4%), e que juntos representaram 59.0% de todo o material.

Tabela 1. Quantidades de resíduos por tipo recebidos pelo ASMOC entre 2012 e 2021

Origem do Resíduo	Quantidade (toneladas)	%
Coleta Domiciliar - Fortaleza	6 722 451.59	32.6
Coleta Especial Urbana - Pontos de Lixo	5 439 223.37	26.4
Coleta Especial Urbana - Entulho	2 912 534.82	14.1
Coleta Particular (Grandes Geradores)	2 131 864.58	10.4
Coleta Domiciliar - Caucaia	1 784 467.47	8.7
Serviço de Capina/Raspagem	992 929.49	4.8
Coleta Especial Urbana - Poda	325 110.12	1.6
Serviços de Varrição	260 982.32	1.3
Serviços Prestados pela Emlurb/Urbfor	26 933.24	0.1
Total	20 596 497.00	100.0



Figura 3. Evolução anual dos quantitativos de RSU recebidos pelo ASMOC.

Entre 2012 e 2021 foi possível observar dois períodos bem diferentes: nos primeiros 03 anos houve aumento das quantidades recebidas no ASMOC e nos 07 anos posteriores uma redução, mesmo que haja uma tendência de voltar ao patamar inicial.

Esses dados possuem, de alguma forma, relação com a aplicação local da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12305/2010), ou seja, com as iniciativas municipais pré-aterro, dentre as quais a política de coleta seletiva via pontos de entrega voluntária (Ecopontos).

Também é importante destacar que a redução da geração dos RSU em Fortaleza acompanhou uma redução a nível nacional, que se deveu a redução do consumo, decorrente da crise econômica, conforme observou a ABRELPE (2017).

A atualização da legislação municipal foi outra importante medida voltada à redução da geração de resíduos. A Lei 10340 (Fortaleza, 2015) estabeleceu que os grandes geradores de resíduos e aqueles que geram resíduos perigosos (independente do volume) são responsáveis pelo custeio dos serviços de gerenciamento, ou seja, o custo desse processo leva o gerador a reduzir a produção de resíduos, diminuindo, ao máximo, a quantidade que será coletada pela empresa contratada. Esse cenário, certamente, influenciou as posturas dos geradores desde 2015, já que foram obrigados a elaborar e cumprir um Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos.

O aumento da fiscalização, por parte da Agência de Fiscalização Municipal - AGEFIS, também tem pressionado os grandes geradores. Na Lei 10340/2015, entende-se por grande gerador: aqueles que produzem resíduos sólidos Classe II, não perigosos, em volume igual ou superior a 100 (cem) litros por dia; aqueles que geram resíduos da construção civil em volume igual ou superior a 50 (cinquenta) litros por dia.

Composição Gravimétrica

As amostras de resíduos provenientes dos veículos compactadores apresentaram entre 46.7 e 46.9% de materiais do Grupo 1 (restos de alimentos, papel, papelão, podas e resíduos de jardim), entre 29.3 e 31.6% de materiais do Grupo 3 (entulho e demais itens não classificados anteriormente) e entre 21.5 e 24.0% de materiais do Grupo 2 (vidros, plásticos e metais), Figura 6.

A presença de material reciclável indica grande desperdício de recursos naturais e financeiros. A falta de uma coleta seletiva porta a porta, somado a carência de programas de educação ambiental para incentivo à segregação, contribui para esse quadro. Apenas os rejeitos (exceto entulhos), conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12305/2010), seriam o grupo mais adequado para disposição no referido aterro.

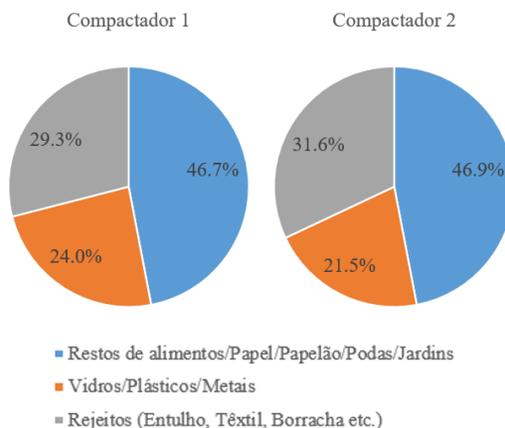


Figura 6. Composição gravimétrica dos RSU coletados pelos veículos compactadores.

A entrada de entulho no aterro sanitário, em particular, representa diminuição da sua vida útil (caso não seja bem processado e empregado como material de cobertura intermediária ou na preparação de vias internas). Atualmente, a maior parte do entulho que chega ao ASMOC vem das atividades de limpeza urbana (e dos conhecidos “pontos de lixo”) e chegam misturados a outras tipologias de resíduos (poda, lixo domiciliar), tornando sua segregação inviável.

As amostras de resíduos das carretas - provenientes da estação de transbordo do Jangurusu - apresentaram entre 49.3 e 50.2% de materiais do Grupo 1, entre 41.1 e 41.7% de materiais do Grupo 3, entre 8.1 e 9.6% de materiais do Grupo 2, Figura 7.

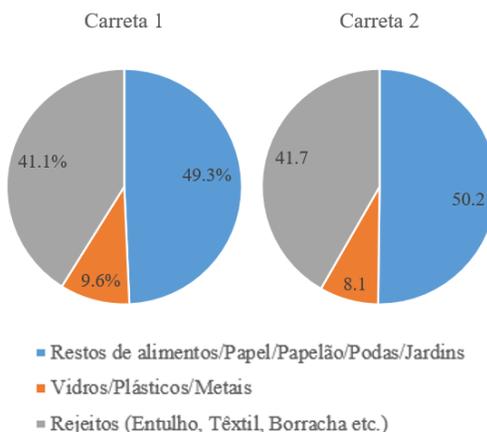


Figura 7. Composição gravimétrica dos RSU coletados pelas carretas.

Assim como nos veículos compactadores, a parcela de material facilmente degradável foi maior, por dois motivos principais: os resíduos da estação do Jangurussu são majoritariamente de origem domiciliar e o trabalho informal dos catadores naquele espaço reduz, significativamente, a presença dos recicláveis. Dessa forma, o que sai da área de transbordo para o ASMOC é majoritariamente fração orgânica e de rejeitos, que relativamente pesam mais.

Por fim, as amostras de resíduos provenientes das caçambas apresentaram entre 38.0 e 39.3% de materiais do Grupo 1, entre 47.9 e 50.0% de materiais do Grupo 3, entre 12.0 e 12.8% de materiais do Grupo 2, Figura 8.

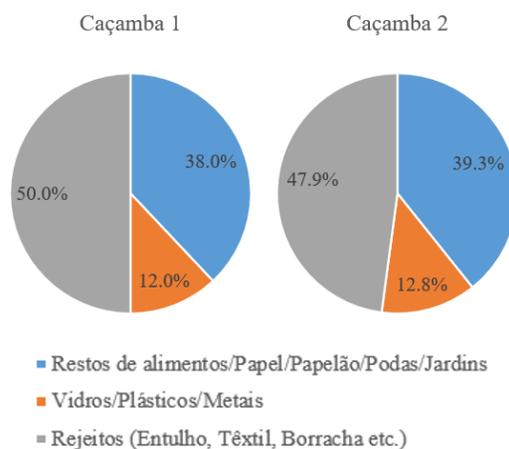


Figura 8. Composição gravimétrica dos RSU coletados pelas caçambas.

Essa composição tem relação direta com o tipo de serviço realizado: as caçambas são utilizadas nas atividades da limpeza urbana, onde há o recolhimento de resíduos de capina, variação, poda de árvores, entulho, entre outros. Elas também são empregadas nos serviços de coleta dos materiais descartados pela população em esquinas, calçadas, terrenos abandonados etc. (chamados em Fortaleza-CE de “pontos de lixo”). Essa tipologia, em geral, não atrai os catadores, por isso a presença de recicláveis é praticamente inalterada.

De modo geral, a composição gravimétrica apontou para grande presença de resíduos degradáveis que, por um lado potencializam a geração e o aproveitamento do metano na usina em operação no aterro, por outro repercutem na geração de maiores volumes de lixiviados (a depender do regime de chuvas e outras variáveis).

Os percentuais de resíduos que formam o Grupo 1, considerando apenas os RSU dos compactadores, apresentaram-se próximos da média brasileira citada pela Abrelpe (2020): 45.3%. Porém, ficou abaixo daqueles observados nas pesquisas em cidades da região nordeste, como em Campina Grande/PB: 56% (Aires, 2013), Recife/PE: 68.60% (Alcântara, 2007), e Barra de São Miguel/PB: 74% (Araújo *et al.*, 2015), resguardadas as particularidades de cada cidade e época da pesquisa.

Massa específica aparente solta

A massa específica aparente solta dos resíduos analisados variou entre 123.75 e 295.42 Kg/m³ (média das 24 amostras: 228.11 Kg/m³). Os maiores valores médios foram registrados nos resíduos provenientes dos veículos compactadores (259.84 Kg/m³), seguidos pelos resíduos das carretas (256.46 Kg/m³) e caçambas (168.02 Kg/m³). Esse comportamento era esperado em função da própria tipologia dos resíduos e diferenças tecnológicas e de operação de cada veículo.

Em linhas gerais, os resíduos coletados pelos compactadores sofrem constante esmagamento do início da coleta até chegarem no aterro sanitário, ou seja, a cada nova “recarga”, os garis acionam o sistema de compactação, aumentando a massa específica. Além disso, os compactadores são deslocados para coleta de resíduos domiciliares, que naturalmente pesam mais em função do elevado teor de umidade e presença de orgânicos, além de menor granulometria.

Os resíduos coletados pelas carretas, além de serem previamente alterados pelo trabalho dos catadores do pátio do Jangurussu, sofrem apenas um esmagamento com pá carregadeira para melhor acomodação e ajuste da lona de cobertura.

Os resíduos coletados pelas caçambas não sofrem nenhum tipo de compactação; são simplesmente arremessados pelos garis sobre o veículo, por isso, apresentaram os menores valores.

A massa específica aparente dos resíduos de Fortaleza esteve dentro do intervalo considerado típico para resíduos soltos: entre 102 e 300 Kg/m³ (Silveira, 2004), acima do registro encontrado por Duarte (2016): 101.75 Kg/m³ e próximo ao encontrado por Alcântara (2007): 227 a 295 Kg/m³. Além disso, os registros de (ρ) do RSU da capital cearense se situaram dentro do intervalo encontrado em uma pesquisa local anterior (Silva e Santos, 2010), ressaltando a importância do rigor no processo de compactação desses resíduos quando colocados dentro das trincheiras, para se alcançar o triplo da massa por m³ (desejável).

Caracterização do solo

Com base nos resultados da caracterização geotécnica, observou-se teor de finos (silte/argila) de 22.5% para o solo da Área 1 e de 30.25% para o solo da Área 2. A CETESB (1993) recomenda um percentual de finos maior que 30% para camada de cobertura de aterro sanitário, e a USEPA (2004) sugere valores no intervalo de 30% a 50%. Nesse quesito, apenas o solo da Área 2 atendeu aos requisitos normativos.

As amostras de solos do aterro velho apresentaram, em média, massa específica seca máxima de 1.93 g/cm^3 , e os do aterro novo, 2.01 g/cm^3 . Esses valores se mostram adequados para camadas de coberturas de aterros sanitários de acordo com os critérios estabelecidos por Kabir e Taha (2004), que recomendam valores acima de 1.45 g/cm^3 .

O estudo geotécnico da camada de cobertura final do ASMOC (Área 1) realizado por Freire (2022) fornece mais dados sobre os solos empregados na cobertura do aterro. Os resultados da caracterização geotécnica revelaram teores de finos (silte/argila) variando entre 11% e 18%, com maiores percentuais de areia fina (41% a 51%). O índice de plasticidade encontrado foi de 5%, e a densidade real dos grãos foi de 2.65 g/cm^3 . Além desses resultados, o estudo também revelou massa específica aparente seca máxima de 2.1 g/cm^3 e massa específica aparente seca natural *in situ* de 1.7 g/cm^3 , o que representou um grau de compactação de 88%.

Segundo Freire (2022), o grau de compactação encontrado no estudo é considerado baixo comparado a outros aterros, sendo esse parâmetro influenciado pelo tipo de equipamento compactador utilizado durante a confecção da camada de cobertura. No ASMOC, o espalhamento do solo de cobertura é realizado por meio de trator de esteira D6T, sendo em seguida compactado com equipamento de rolo liso, o que segundo a autora justifica o baixo valor de grau de compactação encontrado.

Os solos da camada de cobertura da Área 2 (novo aterro) apresentaram menor permeabilidade à água que os solos da Área 1 (aterro desativado), considerando todas as amostras analisadas sob o método da carga variável.

Os resultados das amostras da Área 2, carga variável, variaram entre 1.9×10^{-6} a $3.1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$, enquanto os resultados da Área 1 apresentaram permeabilidade à água entre 3.6×10^{-4} e $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ (Tabela 2).

Pelo método dos anéis concêntricos, as diferenças entre os valores das permeabilidades das áreas foram menores; na realidade, apenas uma amostra da Área 1 teve ordem de grandeza menor, ou seja, a medição *in situ* confirmou o observado nos ensaios de permeabilidade de carga variável (permeabilidade da Área 2 menor que a permeabilidade da Área 1).

Tabela 2. Permeabilidade à água dos solos de cobertura do ASMOC

Período	Permeabilidade (cm/s)			
	Área 1		Área 2	
	Carga variável	Anéis concêntricos	Carga variável	Anéis concêntricos
Janeiro de 2021	3.6×10^{-4}	-	1.9×10^{-6}	-
	4.9×10^{-4}	-	6.2×10^{-6}	-
	4.5×10^{-4}	-	1.2×10^{-5}	-
	1.0×10^{-3}	-	3.1×10^{-5}	-
Fevereiro de 2021	-	2.66×10^{-4}	-	2.12×10^{-4}
	-	1.33×10^{-4}	-	8.87×10^{-5}
	-	5.11×10^{-5}	-	3.22×10^{-4}
	-	5.08×10^{-3}	-	5.32×10^{-5}

A permeabilidade dos solos da Área 1 não atendeu aos limites estabelecidos pela NBR 13896/1997 (10^{-6} cm/s) e pela EPA (2016), 10^{-7} cm/s. Isso indica que a camada de cobertura final dessa área não está cumprindo suas funções adequadamente.

A condutividade hidráulica da camada de cobertura da Área 2 também não atendeu aos requisitos exigidos na norma nacional e internacional, porém, é importante ressaltar que essa cobertura é constituída de camadas intermediárias, já que a nova área do aterro iniciou suas atividades recentemente (2019), onde periodicamente novas células de resíduos são sobrepostas àquelas já existentes. Dessa forma, a permeabilidade da cobertura da Área 2 não pode ser muito baixa, a fim de não comprometer a drenagem dos líquidos no interior do maciço.

Outros estudos encontrados na literatura mostram que solos com alta massa específica seca máxima, associado a altos teores de finos repercutem numa menor permeabilidade à água das camadas de cobertura.

Araujo (2018) analisando os solos de cobertura do aterro em Campina Grande-PB encontrou coeficiente de permeabilidade em laboratório da ordem de 2.77×10^{-6} cm/s, e *in situ* da ordem de 3.87×10^{-6} cm/s, para o solo que apresenta massa específica seca máxima de 1.61 g/cm³, teor de finos de 52.7% e índice de plasticidade de 8%.

Dorneles *et al.* (2016) encontrou para a cobertura do aterro em Santa Maria-RS permeabilidade em laboratório de 1.07×10^{-4} cm/s e *in situ* (anéis concêntricos) de 3.40×10^{-3} cm/s para o solo que apresentou massa específica seca máxima de 1.17 g/cm³, teor de finos de 84% e índice de plasticidade de 23%.

Já Pereira *et al.* (2013) registrou permeabilidade de 1.56×10^{-5} cm/s por meio do ensaio *in situ* dos anéis concêntricos nos solos naturais utilizados na execução de células de aterro de resíduos industriais na cidade de Mossoró - RN. Esse solo apresentou massa específica seca máxima de 1.75 g/cm^3 , teor de finos de 68% e índice de plasticidade de 18%.

Teores de umidade e sólidos voláteis

Nos resíduos sólidos recém-chegados ao aterro

Os teores de umidade (base úmida) nas amostras dos resíduos domiciliares recém coletados e despejados na frente de transbordo variaram entre 60.35 e 67.96%, Tabela 4. A média das 04 amostras ficou em 64.51% de umidade. Já os teores de sólidos voláteis variaram entre 73.09 e 85.54% (média das 04 amostras: 79.41%).

Tabela 4. Teores de umidade e de sólidos voláteis dos resíduos recém-chegados ao aterro

Amostra	Umidade – base úmida (%)	Sólidos Voláteis (%)
A1	65.05	73.09
A2	64.69	85.54
A3	67.96	80.04
A4	60.35	78.97
Média	64.51	79.41

Em linhas gerais, a umidade alta acompanhou os altos teores de sólidos voláteis, revelando que os componentes orgânicos do RSU levam uma parcela considerável de umidade para dentro do aterro.

Resguardada a realidade de cada pesquisa citada na literatura (época, município, tamanho da amostra, idade dos resíduos), pode-se afirmar que os teores de umidade obtidos foram maiores que os observados por Santos (2012), que também estudou os resíduos do ASMOC (19.4 a 29.8%), Oliveira (2011), 37.00%; Melo (2015), 38.31%, ficando mais próximos dos valores encontrados por Aires (2013), 56.51% e Holanda (2016), 70.42%. Sobre os sólidos voláteis, observou-se proximidade com resultados obtidos por Aires (2013): 78.00%.

Nos resíduos aterrados

Os teores de umidade nas amostras dos resíduos aterrados na Área 1 cresceram com a profundidade, indicando a presença de dois fenômenos principais: perda parcial de umidade nas camadas mais superficiais do maciço - em função das trocas com o ambiente externo - e possível acúmulo de líquidos nas camadas mais profundas do maciço.

Tabela 5. Teores de umidade e de sólidos voláteis dos resíduos aterrados na Área 1

Ponto	Profundidade	Umidade (%)	Sólidos Voláteis (%)
1	4m	22.72	25.08
	8m	29.22	24.07
	12m	33.01	9.12
2	4m	20.97	31.49
	8m	26.60	15.20
	12m	34.54	13.10

Na mesma área, os teores de sólidos voláteis diminuíram com a profundidade, mostrando a estratigrafia vertical da degradação dos resíduos. A literatura especializada mostra que, no decorrer do tempo, os teores de sólidos voláteis tendem a diminuir.

A Figura 9 mostra o perfil horizontal dos parâmetros dos RSU aterrados na Área 2. Na primeira campanha (abril - julho de 2021) é possível observar uma heterogeneidade nos resultados de umidade e sólidos voláteis, inclusive essas diferenças ficaram visíveis no momento de escavação para coletar as amostras, com certos locais da célula bastante secos e com pouca matéria orgânica, enquanto outros pontos apresentavam maior presença de orgânicos na massa de lixo aterrada.



Figura 9. Umidade e sólidos voláteis dos resíduos aterrados a 4m (Área 2) e suas respectivas idades de aterramento.

De certa forma, esse comportamento está associado ao fato do aterro receber diferentes tipologias de resíduos, sendo que algumas classes (resíduos domiciliares) carregam consigo alto teor de umidade e de orgânicos, enquanto outros tipos (resíduos de construção, têxteis, etc.) são mais secos e possuem baixo teor de matéria orgânica. Como já foi discutido anteriormente, os ensaios de composição gravimétrica dos resíduos encaminhados ao ASMOC revelaram percentuais de material facilmente degradável inferiores a 50%, valor considerado baixo quando comparados aos resíduos de outras cidades. Além disso, os percentuais de rejeitos (grupo 3) foram altos, sobretudo nos RSU provenientes das carretas e das caçambas basculantes.

Dessa forma, o teor de sólidos voláteis na profundidade de 4m variou de 24.36% a 95.44%, enquanto o teor de umidade se situou entre 31.27% e 52.88%. Os dados apresentados na Figura 9 ainda mostram pouca influência da idade de aterramento dos resíduos nos seus teores de umidade e sólidos voláteis.

Um ano depois (2ª campanha, abril - junho 2022), esses teores foram menores (indicando o consumo da umidade e/ou desidratação natural dos resíduos com o tempo). Neste caso, é possível observar que os teores de sólidos voláteis variaram em função da profundidade e do tempo de aterramento, enquanto os teores de umidade variam, especialmente, em função da profundidade (Figura 10).

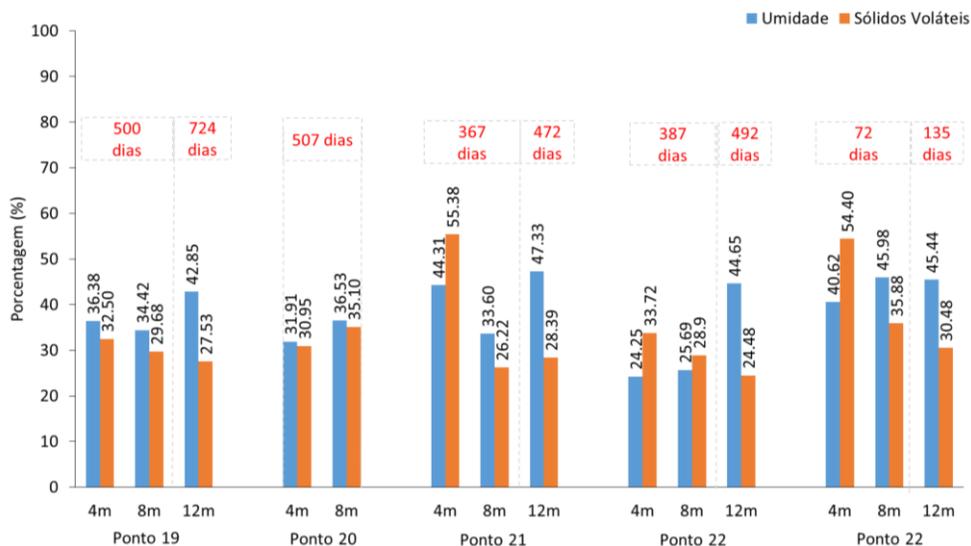


Figura 10. Teores de umidade e sólidos voláteis em diferentes profundidades e idades de aterramento.

As médias dos teores de umidade foram de 35.49% (4m), 35.24% (8m) e 45.07% (12m). Já as médias dos teores de sólidos voláteis foram as seguintes: 41.39% (4m), 38.94% (8m) e 22.18% (12m). Esses dados confirmam um comportamento já esperado para os aterros sanitários: umidade aumentando com a profundidade, pois a tendência é que os líquidos lixivem até o fundo do maciço; e os SV das camadas mais profundas (resíduos antigos) sendo menores do que os das camadas superiores (resíduos novos), tendo em vista que os maciços de aterro são construídos de baixo para cima (alçamento).

Os menores valores de SV se deram no ponto 19, ou seja, aquele em que os resíduos estão submetidos ao maior tempo de aterramento. No ponto 22, onde os resíduos possuem o menor tempo de aterramento, os valores de SV foram maiores. Tendo como base as 16 amostras aterradas a 4m (1ª campanha) e as amostras coletadas a 4m nos pontos 19 e 20 (2ª campanha), observa-se que o teor médio de SV foi de 68.28% para 31.72% após aproximadamente 365 dias, ou seja, uma redução média de 36.56% em um ano. A comparação foi feita entre esses pontos porque eles foram coletados na mesma célula do aterro em períodos distintos.

Em um estudo realizado por Aires *et al.* (2020) numa célula experimental com resíduos do município de Campina Grande – PB, houve uma redução de 45% de sólidos voláteis após 704 dias de aterramento. Durante o monitoramento de um biorreator também em Campina Grande-PB, Ribeiro *et al.* (2016) observaram uma redução de cerca de 60% de sólidos voláteis nos resíduos após 734 dias de aterramento desse material. Alcântara (2007), por meio de seu estudo envolvendo biorreatores, obteve uma redução de 36% de sólidos voláteis nos resíduos da cidade de Recife – PE, ao se passar um período de 365 dias de aterramento.

Dados pluviométricos e suas influências

Os teores de umidade dos resíduos aterrados, sob a influência das precipitações pluviométricas observadas no período de estudo, estão descritos na Figura 11. Os dados de chuvas utilizados foram dos postos de coleta da Fundação Cearense de Meteorologia – FUNCEME, mais próximos ao aterro sanitário.

Observou-se que a incidência das chuvas em 2021 se concentrou entre fevereiro e maio e que a chuva tem um efeito positivo na umidade dos resíduos, porém, o impacto sobre os teores de umidade não se deu, como esperado, de forma imediata. Isso ocorre porque do volume de chuva que cai sobre o terreno, uma parte evapora, outra escorre e outra infiltra até saturar a camada de cobertura. Somente após isso, essa água alcança a massa de resíduos, onde uma parcela será consumida nos processos biológicos, outra alterará a umidade dos resíduos e o excedente constituirá parte dos lixiviados.

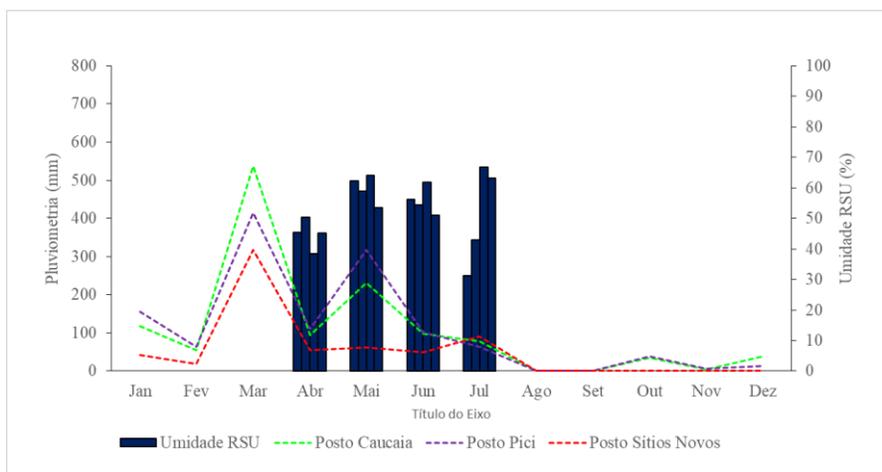


Figura 11. Relação entre a pluviosidade e os teores de umidade dos resíduos aterrados na Área 2.

Catapreta e Simões (2008), em um estudo realizado na CTR de Belo Horizonte, observaram que as vazões de lixiviados não são afetadas imediatamente pelas precipitações, levando certo tempo para que seja observado o efeito das chuvas sobre o volume de líquidos produzidos.

Oliveira (2011) também observou que o lixiviado gerado variava com a pluviosidade, apresentando um tempo de resposta; que no caso foi de aproximadamente 20 dias. O autor observou, por exemplo, que o volume de lixiviado de agosto refletia as chuvas de junho e julho, e que o baixo volume de dezembro refletia a ausência de chuva em novembro.

Capelo Neto *et al.* (1999) buscaram correlacionar o regime pluviométrico e o volume de lixiviado gerado no ASMOC - mesmo aterro desta pesquisa - por meio do monitoramento em escala real e por simulação computacional. Os resultados mostraram que durante o período observado, o volume de lixiviado gerado manteve relação com a precipitação, porém, as curvas obtidas para os dois parâmetros ficaram numa escala menor do que aquelas previstas na simulação computacional.

Esses autores acreditam que isso se deu por conta da atuação da camada de cobertura composta de argila com baixa permeabilidade e pela retenção de líquido no interior da célula de resíduos, trazendo a importância do conhecimento da capacidade de campo dos resíduos nos estudos de balanço hídrico em aterros sanitários, e o fato de que a percolação da água no aterro pode ser acelerada ou atrasada dependendo das condições dos materiais que compõem o maciço (solo e resíduos).

É importante considerar que é exatamente no período chuvoso que ocorre um aumento na geração e captação de metano no ASMOC. Cavalcante (2021) avaliou a qualidade do biogás captado por poços horizontais e verticais dispostos no maciço do referido aterro e os resultados revelaram que as concentrações de gás metano variaram entre a estação chuvosa e a seca. Na primeira campanha, realizada em maio de 2019 (mês chuvoso), a concentração de metano foi de 61%. Na segunda campanha, realizada em julho de 2019, esse valor reduz para 57%, e permanece abaixo desse valor até dezembro do corrente ano. Entre julho e dezembro de 2019, a pluviometria da região do aterro foi próxima a zero.

Conclusões

A análise dos quantitativos de RSU encaminhados ao ASMOC entre 2012 e 2021 mostraram que a coleta domiciliar de Fortaleza e os pontos de lixo da cidade são responsáveis por 60% da geração de resíduos. A composição gravimétrica desses resíduos indicou a predominância de materiais facilmente degradáveis e uma parcela significativa de materiais recicláveis nos resíduos sólidos domiciliares, sinalizando a perda de materiais com valor agregado. Esse cenário demonstra o grande desafio que a cidade de Fortaleza enfrenta na gestão de seus resíduos, evidenciando a necessidade do reforço de políticas públicas e de outros mecanismos que incentivem a redução, reutilização, coleta seletiva, reciclagem e tratamento desses materiais.

A análise dos parâmetros dos resíduos aterrados revelaram um processo de biodegradação rápida. Com base nos teores de umidade e sólidos voláteis da Área 1, percebeu-se resíduos em estágio avançado de decomposição, o que indica um material com matéria orgânica praticamente estabilizada. Na Área 2, os altos teores de umidade e sólidos voláteis, somados à boa relação da pluviosidade com a umidade interna do maciço revelam alto potencial de geração de biogás.

Com relação às camadas de cobertura, os resultados dos ensaios de permeabilidade à água *in situ* e em laboratório mostram que os solos utilizados nas duas áreas estão em desconformidade com o que preconizam as norma brasileira e americana. Embora algumas características desses solos (teor de finos e massa específica aparentes seca máxima) estejam em conformidade com os requisitos exigidos para camada de cobertura, o coeficiente de permeabilidade não atingiu o valor recomendado. Tendo como base a NBR 13896/1997 que estabelece a condutividade hidráulica como o critério essencial para a escolha do solo que será empregado na impermeabilização superficial dos resíduos aterrados, verifica-se que as camadas de cobertura do ASMOC, sobretudo da Área 1, não cumprem sua função adequadamente.

O presente estudo é um dos primeiros sobre o tema no novo aterro sanitário, e seus resultados ajudam a compreender o processo de degradação dos resíduos e o comportamento da camada

de cobertura quanto à permeabilidade. Certamente, os dados aqui apresentados servirão de base para novos estudos no ASMOC e também para subsidiar melhorias na eficiência dos processos de operação do aterro, contribuindo para um melhor controle tecnológico.

Referências bibliográficas

- ABNT, Associação Brasileira De Normas Técnicas (1997) *NBR 13896: Aterros de resíduos não perigosos – critérios para projeto, implantação e operação*. Rio de Janeiro. 12 pp.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2000) *NBR 14545: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável*. Rio de Janeiro. 12 pp.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016) *NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro. 13 pp.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016) *NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação*. Rio de Janeiro. 11 pp.
- ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2017) *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017*. São Paulo, SP. 2017.
- ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2020) *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020*. São Paulo, SP. 2020.
- Aires, K.E. (2013) *Monitoramento das concentrações de gases em uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos na cidade de Campina Grande-PB*. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil e Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013, 118 pp.
- Aires, K. E., Melo, M. C, Oliveira, R., Monteiro, V. E. D. (2020) Análise do processo biodegradativo em resíduos sólidos urbanos aterrados. *Revista DAE*, **68**(223), 136–152.
- Alcântara, P.B. (2007) *Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007, 364 pp.
- Amaral, O.C. (2016) *Avaliação da influência do tempo de aterramento dos resíduos sólidos domiciliares com a vazão e a composição dos gases gerados no aterro sanitário de rio claro – SP*. Monografia (Graduação em Engenharia ambiental), Universidade estadual Paulista, Rio Claro, SP, 93 pp.
- Araújo, N.C., Queiroz, A.J.P., Guimarães, P.L.F., Gomes, A. A. (2015) Gravimetria e abordagem econômica dos resíduos sólidos urbanos do município de Barra de São Miguel – Paraíba. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental (REGETA)*, **19**(3), 67-72.
- Araujo, P. S. (2018) Proposta de monitoramento de camada de cobertura de solo compactado de aterros sanitários: Estudo de caso. *Revista Especializa Online IPOG*, **1**(15), 1-18.
- Belfort, N.T., Santana, D.S., Santos Filho, D.A., Jucá, J.F.T. (2019) Permeabilidade de um solo de comportamento anômalo utilizado para cobertura do Aterro Sanitário de Altinho/PE, *IX Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental*, São Carlos, Brasil.
- Bernardo, S., Soares, A.A., Mantovani, E.C. (2006) *Manual de irrigação*, 8a ed., UFV, Viçosa, Brasil, 625pp.
- 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, Poder Executivo, Brasília, DF, 03 ago. 2010. Seção 1, p. 3.
- Capelo Neto, J., Mota, S., Silva, F.J.A. (1999) Geração de percolado em aterro sanitário no semi-árido nordestino: uma abordagem quantitativa. *Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*, **4**(3), 160-167.

- Carvalho Júnior, F.H., Aquino, M.D., Aquino, A.D., Capelo Neto, J. (2012) Correções no projeto executivo do Aterro Metropolitano Oeste de Caucaia – ASMOC, com vistas a solucionar problemas de concepção da drenagem dos líquidos percolados. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, **5**(3), 105-113.
- Catapreta, C.A.A., Simões, G.F. (2008) Avaliação da relação chuva-vazão de líquidos lixiviados em um aterro sanitário experimental, *XXXI Congresso Interamericano AIDIS*, Santiago, Chile.
- Cavalcante, C.L.A. (2021) *Estudo da composição dos gases de aterro sanitário sob diferentes condições de bombeamento*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental), Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, 2021, 101 pp.
- CEMPRE, Compromisso Empresarial para Reciclagem (2018) *Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado*. 4 ed., São Paulo, Brasil.
- CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (1993) *Resíduos sólidos industriais*. 2 ed., São Paulo, Brasil.
- Cossu, R. (2019) Physical landfill barriers: principles and engineering. In: Cossu, R., Stegmann, R. (Eds.). *Solid Waste Landfilling: Concepts, Processes, Technologies*, Elsevier, Amsterdã (Holanda), 575-631.
- Dornelles, L.E., Antunes, H.B., Sangueluche, T.R., Veras, A., Pinheiro, R.J.B. (2016) Avaliação da condutividade hidráulica de um solo utilizado em aterro sanitário em Santa Maria através de ensaios de campo e de laboratório, *XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Belo Horizonte, Brasil.
- Duarte, D.P. (2016) *Avaliação da bioestabilização dos resíduos sólidos urbanos em lisímetro. Estudo de caso: Cuiabá – Mato Grosso*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Ambiental), Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2016, 128 pp.
- EPA, Environmental Protection Agency (2016) *Environmental Guidelines Solid waste landfills*. EPA: Sydney, 95 pp.
- Freire, S.C. (2022) *Estudo geotécnico da camada de cobertura final do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), Ceará*. Dissertação (Mestrado em Geologia), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022, 118 pp.
- Fortaleza (2015) *Lei nº 10.340, de 28 de abril de 2015*. Altera os arts. 1º ao 33º da Lei 8.408, de 24 de dezembro de 1999, e dá outras providências. Poder Executivo, Fortaleza, CE, 28 abr. 2015.
- Fortaleza (2021) *Ecopontos*. Prefeitura Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente. Acesso em 18 ago. 2021, Disponível em: <https://catalogodeservicos.fortaleza.ce.gov.br/categoria/urbanismo-meio-ambiente/servico/324>.
- Holanda, S.H.B. (2016) *Uso de consórcio microbiano facultativo no estudo da biodegradação e geração de biogás de resíduos sólidos urbanos envelhecidos em aterros*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Geotecnia), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016, 144 pp.
- Kabir, M.H., Taha, M.R. (2004) Assessment of physical properties of a granite residual soil as an isolation barrier. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **92c**, 13 pp.
- Melo, F. H. F. A. (2015) *Caracterização e estudo do gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos em um consórcio municipal do estado de Pernambuco*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2015, 123 pp.
- Oliveira, A.L. (2011) *Estudo da variação do teor de umidade e sólidos totais voláteis dos resíduos sólidos urbanos com a precipitação pluviométrica e suas implicações na geração de lixiviados no Aterro Sanitário Integrado de Cruz das Almas – BA*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2011, 140 pp.
- Oliveira, C.A.A. (2011) *Análise do fluxo de gases na camada de cobertura do Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia (ASMOC)*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011, 97pp.
- Pereira, A.C., Porto Filho, F.Q., Freitas Neto, O., Severo, R.N.F. (2013) Avaliação da condutividade hidráulica para solos compactados utilizados em camadas selantes e análise de estabilidade de aterro para resíduos sólidos da perfuração de poços de petróleo. *Holos*, **4**(1), 16-36.

- Ribeiro, L.S., Silva, A.S., Alves, F.S., Melo, M. C., Paiva, W., Monteiro, V.E.D. (2016) Monitoramento físico-químico de um biorreator com resíduos sólidos urbanos em escala piloto na cidade de Campina Grande (PB). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **21**(1), 1–9.
- Santos, G.O. (2012) *Avaliação do cultivo de gramíneas na superfície de aterro sanitário, com ênfase para a redução da emissão de metano e dióxido de carbono para a atmosfera*. Tese (Doutorado em Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012, 313pp.
- Silva, M.C., Santos, G.O. (2010) Densidade aparente de resíduos sólidos recém coletados, *V Congresso Nordeste de Pesquisa e Inovação*, Maceió, Brasil.
- Silveira, A.M.M. (2004) *Estudo do peso específico de resíduos sólidos urbanos*. Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004, 112 pp.
- USEPA, United States Environmental Protection Agency (2004) *Technical guidance for RCRA/CERCLA final covers*. Washington, DC, 121 pp.
- WHO, International Reference Center for Wastes Disposal (1979) *Methods of Analysis of Sewage Sludge Solid Waste and Compost*. Switzerland, 44 pp.