

Grupo de Resíduos Sólidos: Camadas de cobertura de aterros sanitários

Solid Waste Group: Covering layers of sanitary landfills

Grupo Resíduos Sólidos: Capas de cobertura de rellenos sanitarios

Recebido: 04/08/2022 | Revisado: 16/08/2022 | Aceito: 17/08/2022 | Publicado: 25/08/2022

Riadny Patrícia de Souza Ferreira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3229-2717>
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
E-mail: riadny.ferreira@ufpe.br

José Fernando Thomé Jucá

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8956-7905>
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
E-mail: jucah@ufpe.br

Maria Odete Holanda Mariano

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6027-0510>
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
E-mail: odete.mariano@gmail.com

Antônio Italcly Oliveira Júnior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8297-5068>
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
E-mail: antonioitalcly@hotmail.com

Resumo

A partir da Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), em 2010, a forma adotada para que os resíduos sejam dispostos sem contaminação foi a popularização de aterros sanitários. No aterro, os resíduos são intercalados com solo e, no topo, há solo impermeável – camada de cobertura - para evitar a geração de lixiviado e emissão de gases poluentes. Ao decorrer das pesquisas, a camada de cobertura oxidativa tornou-se uma alternativa viável a fim de reduzir a emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE). Por esse motivo, foi feita uma revisão bibliográfica de 11 trabalhos realizados com essa temática no Grupo de Resíduos Sólidos (GRS), sendo do tipo monografia, dissertação e tese, no intervalo de 2003 a 2019 e uma correlação de dados de pesquisas nacionais e internacionais. A análise foi direcionada aos resultados das classificações do solo, curvas de compactação e de permeabilidade ao ar e à água. De acordo com os resultados, a adição de matéria orgânica diminui a compressibilidade da mistura e melhora a estabilidade da camada de cobertura diante da variação climática. Além disso, há aumento da capacidade de retenção de água melhorando o desempenho da oxidação das bactérias metanotróficas e da barreira física impermeável. E, quanto à compactação, a adição da matéria orgânica indica uma maior facilidade na compactação da mistura. Os estudos indicaram, além da coerência dos resultados para a aplicação em aterros sanitários e seu potencial oxidativo, a necessidade de acrescentar parâmetros nas análises para melhor fundamentar as pesquisas atuais e futuras.

Palavras-chave: Aterro sanitário; Oxidação; Efeito estufa; Matéria orgânica.

Abstract

From the National Solid Waste Policy Law (PNRS), in 2010, the way adopted for the waste to be disposed of without contamination was the popularization of sanitary landfills. At the landfill, the waste is interspersed with soil and, on top, there is impermeable soil – a cover layer – to avoid the generation of leachate and the emission of polluting gases. During the research, the oxidative cover layer became a viable alternative in order to reduce the emission of Greenhouse Gases (GHG). For this reason, a bibliographic review of 11 works carried out with this theme in the Solid Waste Group (GRS) was carried out, being of the monograph, dissertation and thesis type, in the range from 2003 to 2019 and a correlation of data from national and international research. The analysis was directed to the results of soil classifications, compaction curves and air and water permeability. According to the results, the addition of organic matter decreases the compressibility of the mixture and improves the stability of the cover layer in the face of climatic variation. In addition, there is an increase in the water retention capacity, improving the performance of the oxidation of methanotrophic bacteria and the impermeable physical barrier. And, as for the compaction, the addition of organic matter indicates a greater ease in the compaction of the mixture. The studies indicated, in addition to the consistency of the results for the application in sanitary landfills and its oxidative potential, the need to add parameters in the analyzes to better support current and future research.

Keywords: Landfill; Oxidation; Greenhouse effect; Organic matter.

Resumen

A partir de la Ley de Política Nacional de Residuos Sólidos (PNRS), en 2010, la forma adoptada para que los residuos sean dispuestos sin contaminación fue la popularización de los rellenos sanitarios. En el relleno sanitario, los residuos se intercalan con tierra y, encima, hay tierra impermeable -una capa de cobertura- para evitar la generación de lixiviados y la emisión de gases contaminantes. Durante la investigación, la capa de cobertura oxidativa se convirtió en una alternativa viable para reducir la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Por ello, se realizó una revisión bibliográfica de 11 trabajos realizados con esta temática en el Grupo de Residuos Sólidos (GRS), siendo del tipo monografía, disertación y tesis, en el rango de 2003 a 2019 y una correlación de datos de investigaciones nacionales e internacionales. El análisis estuvo dirigido a los resultados de clasificaciones de suelos, curvas de compactación y curvas de permeabilidad al aire y al agua. De acuerdo con los resultados, la adición de materia orgánica disminuye la compresibilidad de la mezcla y mejora la estabilidad de la capa de cobertura frente a la variación climática. Además, se produce un aumento de la capacidad de retención de agua, mejorando el rendimiento de la oxidación de las bacterias metanótrofas y la barrera física impermeable. Y, en cuanto a la compactación, la adición de materia orgánica indica una mayor facilidad en la compactación de la mezcla. Los estudios indicaron, además de la consistencia de los resultados para la aplicación en rellenos sanitarios y su potencial oxidativo, la necesidad de agregar parámetros en los análisis para sustentar mejor las investigaciones actuales y futuras.

Palabras clave: Relleno sanitario; Oxidación; Efecto invernadero; Materia orgánica.

1. Introdução

O crescente efeito do capitalismo para o desenvolvimento industrial das grandes cidades apresentou consigo uma maior geração de resíduos e poluentes para o meio ambiente e atmosfera. A análise para suscitar mudanças de temperatura, provocadas pelo aumento de máquinas e indústrias, despertou a atenção dos críticos. Em 1990, foi realizado um Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática em que os cientistas propuseram a utilização de meios de baixo carbono a fim de reduzir as emissões gasosas. Ao longo do tempo, houve outras conferências e projetos – como indicados na Figura 1 - para a revisão das condições ambientais provocadas por ações humanas. A ECO92 em 1992, o Protocolo de Kyoto em 1997, a Conferência das Partes em 2012 e o Acordo de Paris em 2015 foram realizados a fim de definir metas para redução de gases e temperatura. (Batista, 2014; CEU, 2018)

No Brasil, a intervenção legal no tocante ao meio ambiente – de forma mais direta - ocorreu através da criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos em 2010. A extinção do mecanismo de disposição de resíduos em lixões foi definida como meta até 2014 com maior exigência através da Lei 12.305/2010 (Brasil, 2010). Assim, considerando que – em 2015 - 3,35% das emissões gasosas são consequentes dos tratamentos de resíduos (Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa - SEEG, 2017), a lei objetiva também mitigar esse impacto e a atingir meta estipulada. Entretanto, com o decorrer dos anos, a efetividade - ainda lenta - resultou numa prorrogação do prazo para o intervalo entre 2018 e 2021.

A disposição final dos resíduos por um longo tempo concentrava-se em lixões e aterros controlados que prejudicavam intensamente o meio ambiente. A alternativa proposta foi o uso de aterros sanitários com a devida fiscalização a fim de assegurar que o subsolo e atmosfera fossem preservados.

No funcionamento dos aterros sanitários, há formação de lixiviado e gases devido a biodegradação da matéria orgânica inserida da massa de lixo. No sistema solo-lixo-atmosfera, o subsolo é coberto com material impermeável e/ou camada de solo com baixa permeabilidade; as camadas intermediárias possuem vias preferenciais para o fluxo ascendente de gases e a camada de cobertura final é composta de material de baixa permeabilidade e finalizada com gramíneas. O sistema de cobertura dos resíduos é o principal elemento de projeto para evitar ou minimizar a poluição do ar devido aos gases gerados em aterros de resíduos sólidos, já que é o elo existente entre o ambiente interno dos resíduos e a atmosfera (Mariano, 2008).

A camada de cobertura final dos aterros deve atender aos requisitos básicos que, apesar de não existir especificações de espessura, tipo e característica em norma, USEPA (2017); NBR 13896 (ABNT, 1997) exige um valor de permeabilidade abaixo de 10^{-7} m/s. O atendimento deste parâmetro assegura a barreira física e hidráulica, evitando a emissão fugitiva do gás metano e infiltração de água. O gás metano é, de acordo com o parâmetro de Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potential

– GWP) (CETESB, 2018), 21 vezes mais poluente que o dióxido de carbono. Considerando o dano que esse gás pode causar, o desenvolvimento de estudo e aplicação de métodos que reduzam a emissão do gás na atmosfera auxilia legal e ambientalmente o meio ambiente.

Apesar, dos problemas recorrentes, a intervenção de outros países com o meio acadêmico é capaz de promover formas mais eficientes do cuidado com o ambiente quanto à destinação de resíduos. Então, com a finalidade de ampliar os estudos na linha de pesquisa e cooperar com o meio ambiente, mais recentemente, firmou-se uma cooperação Brasil-Alemanha denominada ProteGEEr. Os pontos específicos abrangem a promoção de uma gestão sustentável e integrada de resíduos sólidos urbanos, preservação dos recursos naturais e redução do uso de energia e a emissão de gases de efeito estufa. (Protegeer, 2018).

Para atuar diretamente na barreira física e/ou biológica no aterro, o sistema de cobertura de resíduos é subdividido em convencional, barreira capilar e biorreativa (ou oxidativa). A última classificação é composta de solo e composto orgânico a fim de promover oxidação do metano através das bactérias presentes na matéria orgânica. Além do material que amplia as funções da camada, a adaptabilidade do uso do solo-base possibilita soluções para locais com poucas jazidas.

Com a concentração do estudo no mecanismo de degradação de metano e características inerentes aos materiais utilizados, é possível desenvolver técnicas e aplicações mais viáveis para a aplicação em aterros sanitários. Dessa forma, o uso de camadas de cobertura oxidativas pode auxiliar na redução da emissão de gases poluentes na atmosfera ao modificar o CH₄ quimicamente em CO₂ e água. Assim, foi feita uma comparação dos dados geotécnicos dos solos do GRS com resultados da literatura internacional.

Logo, a finalidade da pesquisa está em cooperar com a pesquisa na área de camadas de cobertura e proporcionar praticidade na procura de dados no meio de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.

2. Metodologia

2.1 Levantamento de dados

As teses, dissertações e trabalhos de conclusão de curso usadas como base foram acessadas através da área de teses e dissertações (dentro da aba “publicações”) do site do Grupo de Resíduos Sólidos (www.grs-ufpe.com.br), do orientador correspondente e dos próprios autores. Quanto aos trabalhos usados para comparação teórica e experimental, todos foram encontrados através de pesquisa no Science Direct, Elsevier e sites de universidades; utilizando *landfill layer*, *methane oxidation* e *permeability landfill layer* como palavras-chaves. Os trabalhos escolhidos tinham em comum os ensaios e/ou parâmetros das teses e dissertações, são eles: ensaio de caracterização (granulometria e compactação) e de permeabilidade ao ar e à água. A identificação dos autores e ano dos trabalhos estudados seguem na Tabela 1.

Tabela 1 - Trabalhos estudados.

Maciel (2003) - Dissertação	Costa (2015) – Tese
Alcântara (2007) - Tese	Gomes (2017) – Monografia
Mariano (2008) - Tese	Almeida (2017) – Dissertação
Purificação (2009) - Dissertação	Lira (2017) – Dissertação
Lopes (2011) – Tese	Oliveira Júnior (2018) - Dissertação
Oliveira (2013) - Dissertação	

Fonte Autores (2020).

2.2 Análise de dados

Para a avaliação dos dados coletados, serão comparados no tocante a natureza das propriedades. Então, quanto a

composição e classificação dos materiais, de acordo com a literatura e resultados obtidos, o comportamento da camada de cobertura será avaliado tanto no uso solo puro quanto em materiais alternativos, analisando cada proporção.

O material escolhido para ser utilizado em camadas de cobertura devem obedecer às condições normatizadas preestabelecidas. Dessa forma, a curva granulométrica foi feita para classificar o solo e ser usada para comparar componentes que crescem ou decrescem (granulometria, limites de consistência e densidade real dos grãos), de acordo com as proporções escolhidas. Assim, pode-se notar seus benefícios ou malefícios para o desempenho de impermeabilização e barreira física da camada de cobertura.

Quanto à curva de compactação, através do ensaio de Proctor Normal, pode-se avaliar as condições dos grãos e estrutura em suas condições ótimas bem como a viabilidade da execução da compactação em campo. Para isso, será feita uma comparação entre os resultados das curvas obtidas a fim de observar as variações de umidade ótima e densidade aparente seca.

Quanto à permeabilidade vertical ao ar e à água, a análise é feita para obedecer às normas vigentes no tocante à função de barreira física para a massa de resíduos. Entretanto, a avaliação também se correlaciona com a variação térmica e capacidade de retenção pelos materiais finos da camada de cobertura.

O ensaio, em laboratório, é realizado através do permeâmetro de parede flexível - Modelo Tri-flex 2 da Soil Test – ELE. Seguindo as instruções da norma ASTM D5084-10 (ASTM, 2010) e considerando a Lei de Darcy, é possível determinar o coeficiente de permeabilidade saturada (para água) e a permeabilidade intrínseca do fluido (para o ar) com equações conhecidas na literatura.

3. Resultados e Discussão

Mediante a coleta dos dados dos trabalhos citados, os valores serão comparados com a literatura nacional e internacional com a finalidade de pontuar as coerências e, caso existam, inconsistências.

3.1 Composição e classificação dos materiais

As camadas de cobertura devem obedecer a alguns parâmetros para estarem aptas à utilização nos aterros sanitários. Um dos critérios é a plasticidade do material que, segundo Maia, et al., (2015), ilustra a forma que o solo irá se comportar na variação de umidade. Alguns IP's da Tabela 2 foram arredondados pondo um padrão de números significativos.

Tabela 2: Composição e classificação dos materiais.

Material utilizado	Classificação (SUCS)	IP (%)	$\gamma_{\text{grãos}}$ (g/cm ³)	Referência
Solo da jazida da Muribeca	CH (argila de alta compressibilidade)	30	2,63	Maciel (2003)
Solo da jazida da Muribeca	MH (silte de alta compressibilidade)	19	2,65	Alcântara (2007)
Solos da jazida de Aguazinha	SC (areia argilosa)	15	-	Mariano (2008)
	CL (argila de baixa compressibilidade)	17	-	
Solo da jazida da Muribeca	CH (argila de alta compressibilidade)	27	2,67	Purificação (2009)
Solo e composto (3:1)	MH (silte de alta compressibilidade)	18	2,51	
Solo 1 da jazida da Muribeca	ML (silte de baixa compressibilidade)	13	2,62	Lopes (2011)
Solo 2 da jazida da Muribeca	ML (silte de baixa compressibilidade)	13	2,63	
Solo 1 e composto (1:1)	MH (silte de alta compressibilidade)	12	2,45	
Solo 2 e composto (3:1)	MH (silte de alta compressibilidade)	17	2,53	
Solo 1 da jazida da Muribeca	ML (silte de baixa compressibilidade)	14	2,66	
Solo 2 da jazida da Muribeca	ML (silte de baixa compressibilidade)	14	2,65	Oliveira (2013)
Solo 1 e composto (1:1)	ML (silte de baixa compressibilidade)	11	2,62	
Solo 2 e composto (3:1)	ML (silte de baixa compressibilidade)	13	2,59	
Solo puro da Muribeca	ML (silte de baixa compressibilidade)	17	2,72	Costa (2015)
Solo e composto (1:1)	ML (silte de baixa compressibilidade)	11	2,57	
Solo puro de Muribeca (1)	ML (silte de baixa compressibilidade)	13	2,72	Lira (2017), Gomes (2017) e Almeida (2017)
Solo puro de Caruaru (2)	SM (areia siltosa)	7	2,83	
Solo 1 e composto (1:1)	SM (areia siltosa)	10	2,54	
Solo 2 e composto (1:1)	SM (areia siltosa)	3	2,58	
Solo puro sem fibra de coco	CL (argila de baixa compressibilidade)	18	2,62	Oliveira Júnior (2018)

Fonte: Autores (2022).

De acordo com a Agência Embrapa de Informação Tecnológica - AGEITEC (2019), o acréscimo de composto orgânico aumenta a capacidade de troca catiônica (CTC), diminui a plasticidade do solo e aumenta a sua capacidade de retenção. O aumento da CTC promove melhor interação elétrica entre os grãos da mistura de solo e entre a mistura e a água, fazendo com que a massa de solo retenha maior quantidade de água. Já a baixa plasticidade confere ao material uma menor deformabilidade, evitando a formação de fissuras num ciclo de umedecimento e secagem. Enquanto a capacidade de retenção de solo acrescida garante as condições vitais das bactérias metanotróficas no tocante à umidade. Assim, é possível observar os benefícios para o comportamento de camadas em campo, ao ter que funcionar como barreira física e garantir a estanqueidade do aterro. Vale salientar uma semelhança interessante encontrada no trabalho de Nascimento et al (2021): a adição de resíduos da construção civil, com características similares ao composto quanto ao “não plástico e não líquido”, também reduz – numericamente – a plasticidade do material.

Segundo Pedersen et al (2011), a utilização de materiais mais porosos tende a causar uma maior taxa de emissão de CH₄ na atmosfera, fazendo com que os solos que se enquadrassem nessas condições fossem descartados na pesquisa. Nisso, apesar da porosidade do solo inicialmente ser um problema, a Tabela 2 mostra que ao ser misturado com materiais alternativos – como o composto orgânico, no caso dos trabalhos de Lira (2017), Gomes (2017) e Almeida (2017), a mistura do solo de Caruaru ainda teve uma redução da plasticidade. Tal resultado poderia indicar o descarte do material, entretanto, segundo Maia, et al., (2015), a queda do valor favorece o não-surgimento de fissuras num ciclo de umedecimento e secagem e a baixa compressibilidade do mesmo. E, como o material seria utilizado em uma região do Semiárido Pernambucano, seus resultados continuaram consistentes

com a aplicação.

A situação de baixa compressibilidade, como dito anteriormente, confere aos materiais a estabilidade diante da mudança climática. Logo, os resultados encontrados nos trabalhos de Mariano (2008), Lopes (2011), Oliveira (2013), Costa (2015), Lira (2017), Gomes (2017), Almeida (2017) e Oliveira Júnior (2018) tiveram solos com baixa compressibilidade – caracterizado pela segunda letra “L” do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), sendo favoráveis ao uso na camada de cobertura de aterros.

Ainda quanto à plasticidade, também é importante observar a diferença nas proporções dos compostos orgânicos nas misturas e sua capacidade de aumentar ou reduzir o Índice de Plasticidade (IP) do material. Isso é notável nos trabalhos de: Purificação (2009), com decréscimo da plasticidade; Lopes (2011) com a redução do IP na proporção 50:50 (em peso) ou 1:1 e aumento quando 75:25 (em peso) ou 3:1; e Oliveira (2013) que obteve redução em ambas as reproduções semelhantes às proporções de Lopes (2011). Isso é explicado devido à quantidade da fração de areia do composto orgânico por ser mais granular que o solo natural analisado (Santos, 2015).

3.2 Curva de compactação

A compactação é extremamente importante na situação de campo de camadas de cobertura de aterros sanitários devido à movimentação de caminhões no topo dos taludes a fim de espalhar os resíduos e compactar as camadas finais. Além disso, a compactação altera a porosidade do meio e, conseqüentemente, o fluxo dos substratos gasosos e a oxidação (Maldaner, 2011).

Assim, o controle da compactação é diretamente relacionado à eliminação dos vazios entre os grãos, garantindo que a condutividade hidráulica estudada seja projetada em serviço. A Tabela 3 dispõe dos dados dos ensaios de compactação.

Tabela 3: Resultados da compactação dos materiais.

Material utilizado	$\gamma_{\text{máx}}$ (g/cm ³)	$\omega_{\text{ótima}}$ (%)	Referência
Solo da jazida da Muribeca	1,61	23	Maciel (2003)
Solo da jazida da Muribeca	1,59	20	Alcântara (2007)
Solos da jazida de Aguazinha	1,85	14,5	Mariano (2008)
Solo da jazida da Muribeca	1,64	19,5	Purificação (2009)
Solo e composto (3:1)	1,35	19	
Solo 1 da jazida da Muribeca	1,61	19,9	Lopes (2011)
Solo 2 da jazida da Muribeca	1,61	19	
Solo 1 e composto (1:1)	1,3	22,9	
Solo 2 e composto (3:1)	1,46	18,4	
Solo 1 da jazida da Muribeca	1,65	19,1	Oliveira (2013)
Solo 2 da jazida da Muribeca	1,65	19,1	
Solo 1 e composto (1:1)	1,51	21,5	
Solo 2 e composto (3:1)	1,54	20,8	
Solo puro da Muribeca	1,62	20	Costa (2015)
Solo e composto (1:1)	1,42	26	
Solo puro de Muribeca (1)	1,66	20	Lira (2017), Gomes (2017) e Almeida (2017)
Solo puro de Caruaru (2)	1,93	12,8	
Solo 1 e composto (1:1)	1,39	26	
Solo 2 e composto (1:1)	1,44	23	
Solo puro sem fibra de coco	1,68	19,2	Oliveira Júnior (2018)
Solo com 0,5% de fibra de coco	1,66	19,4	
Solo com 1% de fibra de coco	1,64	19,6	

Fonte: Autores. (2022).

Os resultados foram coerentes com os encontrados recentemente por Santos (2015), que ratifica o aumento da umidade ótima e a redução do peso específico aparente seco ao adicionar composto orgânico na mistura. Os trabalhos apresentaram curvas mais achatadas, confirmando que as curvas de compactação das misturas se assemelham às características de solos argilosos.

Além disso, considerando a fibra de coco para o aumento da resistência ao cisalhamento e estabilidade dos taludes de aterros sanitários, os resultados de Oliveira Júnior (2018) ratificaram o aumento da umidade ótima e redução da densidade. Apesar do maior índice de vazios, os resultados para um acréscimo de 1% de fibras mediante à resistência ao cisalhamento demonstraram melhor desempenho a favor da segurança dos taludes, onde o efeito na resistência está relacionado à compactação e à resistência à tração da fibra.

Segundo Gebert et al (2011), o estudo de mistura de solo granular e composto orgânico utilizou o grau de compactação de 85% para simular a movimentação de maquinário pesado sobre o material. A escolha do grau de compactação influencia diretamente na entrada de oxigênio na camada para que as bactérias metanotróficas realizem a respiração a fim de que a oxidação ocorra. Apesar da Tabela 3 não explanar tais valores pontualmente, os valores foram estimados pela literatura para compactar os solos nos trabalhos experimentais devido a ausência de simulações em campo.

Apesar dos valores encontrados pelo autor citado anteriormente, os trabalhos de Lira (2017), Gomes (2017) e Almeida (2017) adotaram um grau de compactação das colunas experimentais de 75% e obtiveram bons resultados da oxidação do metano.

Para os trabalhos com camadas convencionais, Mariano (2008) encontrou graus de compactação que variaram de 90 a 95%. Nos estudos de Lopes (2011) e Oliveira (2013), o grau de compactação de campo esteve entre 70 e 100% sendo que mais próximos de 70% nas camadas convencionais e próximos de 100% nas camadas oxidativas. Dessa forma, pode-se sugerir que a adição do composto orgânico facilita o processo de compactação da camada de cobertura.

Considerando as condições de campo, onde o resíduo e o solo são compactados com trator de esteira com movimentos repetitivos, o solo precisa estar nas condições adequadas para garantir a barreira física e bom mecanismo para a oxidação do metano - que ascende da massa de lixo. De acordo com ensaios realizados por Lira et al (2020), apesar da adição do composto orgânico reduzir a coesão e o ângulo de atrito da mistura, ainda assim, apresenta-se como uma alternativa viável ao uso nos aterros. Dessa forma, os ensaios de laboratório e controle de compactação de campo conseguem manter as circunstâncias estudadas e comprovadas pela literatura expostas anteriormente e que ainda serão analisadas no futuro.

3.3 Ensaios de permeabilidade ao ar e à água

Para garantir a estanqueidade da camada de cobertura quanto à chuva e a prevenção de formação de fissuras diante do ciclo de umedecimento e secagem, o estudo da permeabilidade à água e ao ar compõe o conjunto de condicionantes para o melhor desempenho em campo. Os dados encontrados estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4: Permeabilidades ao ar e à água.

Material utilizado	K _{AR} (m/s)	K _{ÁGUA} (m/s)	Referência
Solo da jazida da Muribeca	1,5×10 ⁻⁹	-	Maciel (2003)
Solo da jazida da Muribeca	1×10 ⁻⁹	1,1×10 ⁻⁸	Alcântara (2007)
Solos da jazida de Aguazinha	10 ⁻⁶ a 10 ⁻⁸	10 ⁻⁶ a 10 ⁻⁸	Mariano (2008)
		10 ⁻⁸ a 10 ⁻⁹	
Solo da jazida da Muribeca	6,62×10 ⁻⁷	-	Purificação (2009)
Solo e composto (3:1)	5,75×10 ⁻⁷	-	
Solo 1 da jazida da Muribeca	4×10 ⁻⁸	1,5×10 ⁻⁹	Lopes (2011)
Solo 2 da jazida da Muribeca	2,2×10 ⁻⁷	4,4×10 ⁻⁸	
Solo 1 e composto (1:1)	2,3×10 ⁻⁵	2,8×10 ⁻⁶	
Solo 2 e composto (3:1)	3,2×10 ⁻⁷	9,2×10 ⁻⁸	
Solo 1 da jazida da Muribeca	3,6×10 ⁻⁴	1,3×10 ⁻⁷	Oliveira (2013)
Solo 2 da jazida da Muribeca	-	-	
Solo 1 e composto (1:1)	-	-	
Solo 2 e composto (3:1)	-	-	
Solo puro da Muribeca	3-5×10 ⁻⁹	4,2×10 ⁻⁹	Costa (2015)
Solo e composto (1:1)	6-8,5×10 ⁻⁹	1,9×10 ⁻⁹	
Solo puro de Muribeca (1)	-	-	Lira (2017), Gomes (2017) e Almeida (2017)
Solo puro de Caruaru (2)	-	-	
Solo 1 e composto (1:1)	Impermeável	2,77×10 ⁻⁹	
Solo 2 e composto (1:1)	1,06×10 ⁻⁷	3,59×10 ⁻⁸	
Solo puro sem fibra de coco	-	1,01×10 ⁻⁹	Oliveira Júnior (2018)
Solo com 0,5% de fibra de coco	-	1,2×10 ⁻⁹	
Solo com 1% de fibra de coco	-	1,43×10 ⁻⁹	

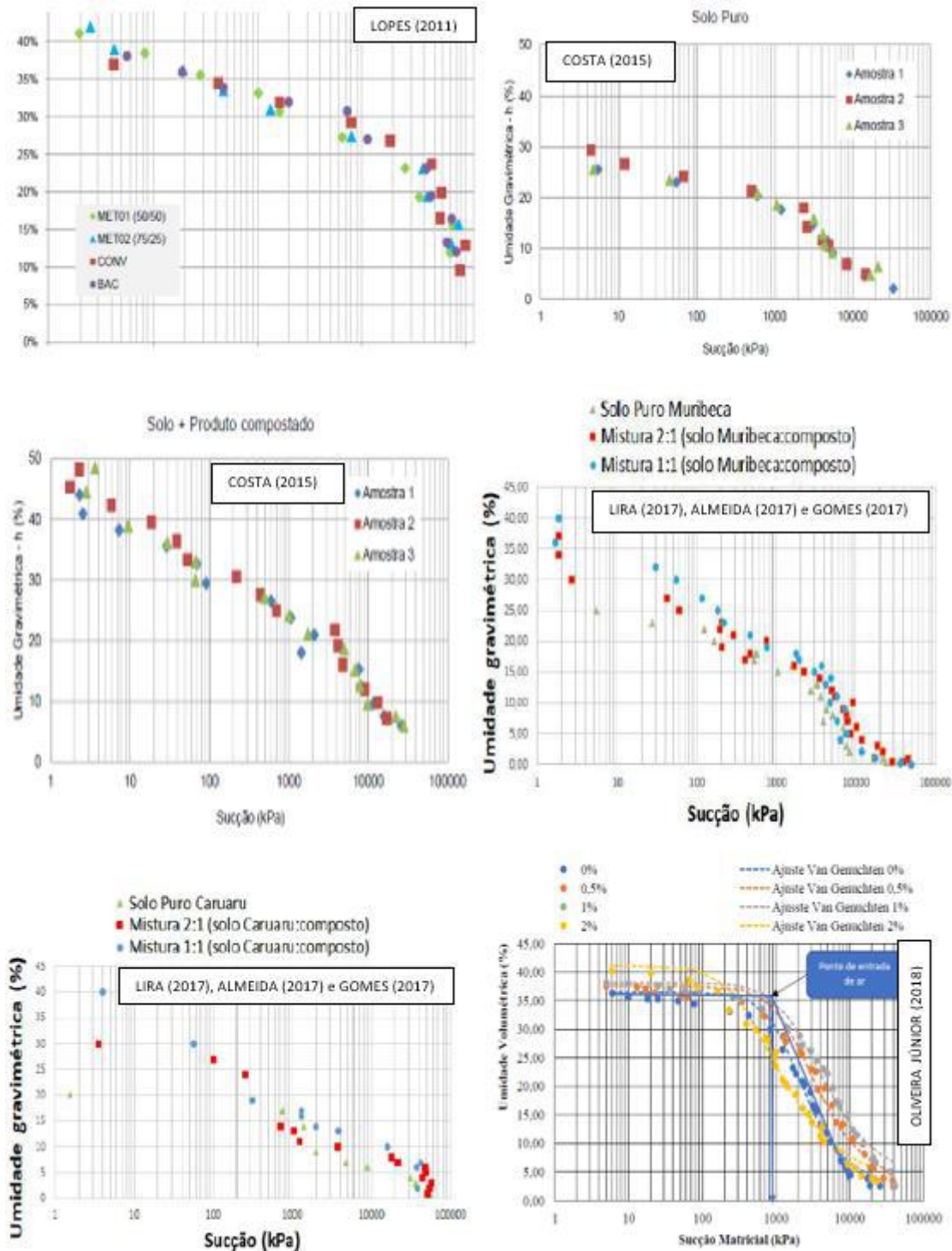
Fonte: Autores. (2022).

De acordo com a NBR 13.896 (ABNT, 1997), o aterro deve ser executado em local com subsolo com permeabilidade inferior a 5.10⁻⁵ cm/s ou 5.10⁻⁷ m/s. Assim, observando acima a Tabela 4, os valores encontrados – em sua maioria – estiveram dentro da condição normatizada.

Como o sistema de camadas de cobertura necessita de um controle do fluxo de líquidos e gases, é importante avaliar todos os fatores intervenientes desse sistema. Pelo fato de o solo compor um meio heterogêneo, muitas vezes pode-se associar isoladamente a barreira de fluxo de gases com a quantidade de água que preenche os vazios do solo. Entretanto, conforme Jucá e Maciel (2006), a permeabilidade ao ar não é apenas função da umidade, mas também a interação entre o teor de água, a densidade e estrutura do solo compactado.

Assim, os autores encontraram uma correlação – já esperada - entre a permeabilidade ao ar e o grau de saturação, pois notaram que a permeabilidade decrescia antes de chegar à umidade ótima e depois seguia com um valor constante. Jucá e Maciel (2006) comprovaram que o aumento do grau de saturação era capaz de tornar o solo praticamente impermeável ao ar. Os resultados cooperam na utilização das camadas de cobertura tanto em locais mais chuvosos quanto em locais mais áridos.

Figura 1: Curvas características de alguns trabalhos.

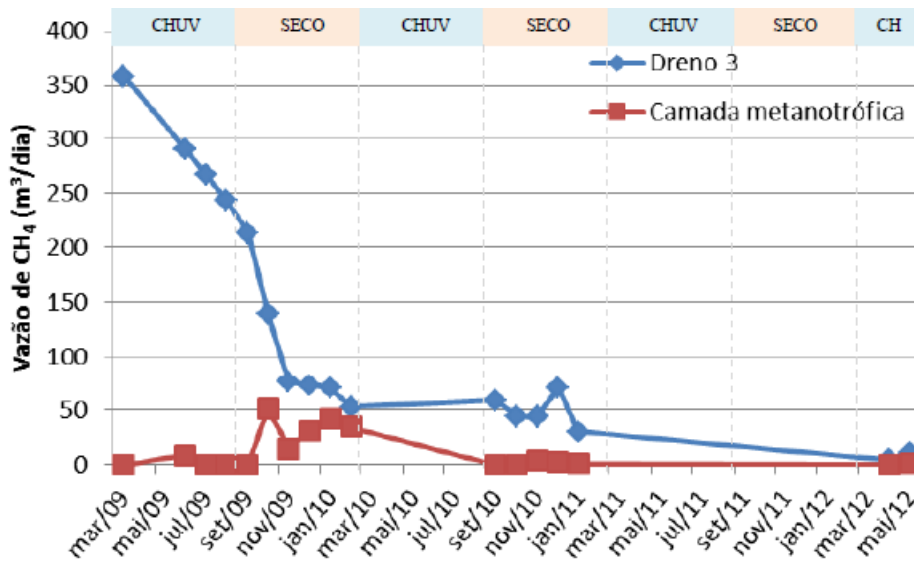


Fonte: Autores. (2022).

De acordo com Gülser (2017), o aumento massivo da matéria orgânica pode aumentar a capacidade de retenção e diminuir a condutividade hidráulica do solo. Quanto à capacidade de retenção, os resultados foram coerentes nas curvas características dos materiais – contidas nos trabalhos referenciados na Tabela 4 e ilustradas na Figura 1. Entretanto, ao analisar os resultados obtidos por Lopes (2011), Oliveira (2013) e Oliveira Júnior (2018) contrariam a proposição de Gülser (2017) pois não houve queda significativa nos valores da permeabilidade à água. Vale salientar que o material inserido por Gülser (2017)

era composto de cascas de avelã que podem ter características mais propensas a impedir a passagem de água na massa de solo.

Figura 2: Emissão de gases na camada oxidativa ao longo do tempo.



Fonte: Oliveira (2013).

Considerando a variação climática pela qual a camada oxidativa é exposta em locais de clima tropical, a Figura 2 mostra como a camada se comporta no tocante às emissões. É possível observar que o material teve uma redução da emissão de metano no período de três anos observado pela autora.

Portanto, tanto os materiais de jazida com características predominantemente argilosas quanto as misturas com material orgânico resultaram em uma massa de solo coerente para a exposição às intempéries da região. O composto orgânico é capaz de reter maior quantidade de água, evitando as fissuras quando disposto em locais mais áridos e, para locais mais chuvosos, funciona como barreira física para o fluxo de gases do efeito estufa. E, a fibra de coco, do trabalho de Oliveira Júnior (2018), com até 1% na matriz argilosa também aumentou a capacidade de retenção de líquidos.

4. Considerações Finais

Percebeu-se que a área geoambiental das camadas de cobertura de aterros sanitários tem estudos atualizados e cada vez mais renovados ao longo do tempo. A metodologia de utilizar materiais alternativos que forneçam matéria orgânica ao solo para a oxidação atribuiu-lhes importância geotécnica e utilidade ambiental.

Como a adaptação do material às intempéries é essencial para a não formação de fissuras, o composto orgânico advindo de podas de árvore aplicados apresentaram resultados satisfatórios para uso em camadas de cobertura de aterro sanitários. O aumento da capacidade de retenção de água aferiu à mistura a umidade necessária às bactérias metanotróficas enquanto funciona como barreira física impermeável.

A partir dos resultados de compactação, é possível notar que a faixa de valores acima de 75%, o grau de compactação do solo de cobertura apresentou uma estrutura mais favorável. A importância deve-se à movimentação de maquinários pesados na superfície como do fluxo de gases e percolação na massa de solo. Além de que, com o material resultante de um mecanismo com menor quantidade de vazios, é possível obter maior estabilidade na massa de solo devido ao maior entrosamento dos grãos.

Para uma melhor representação de eficiência de oxidação do gás metano, recomenda-se uma maior implementação de ensaios de campo. Apesar do trabalho em laboratório apresentar dados adicionais e indicar parâmetros com necessidade de

controle, o trabalho em campo é capaz de apresentar resultados de base qualitativa e quantitativa para a evolução dos estudos. Isso pôde ser visto nos trabalhos mais antigos realizados pelo Grupo de Resíduos Sólidos com a análise de mudanças de variáveis de campo e a devida intervenção por conhecimentos prévios de laboratório.

O levantamento bibliográfico agrupou os trabalhos realizados em campo e laboratório, e comparou, associando aos resultados obtidos em experimentos nacionais e internacionais. Pôde-se ratificar a eficiência dos estudos atuais e, também, pontuar quais lacunas – como dados de temperatura, relação C/N, pH e grau de saturação - ainda necessitam ser preenchidas para complementar e devem ser seguidos para melhorar a linha de pesquisa.

Assim, indica-se a coleta conjunta de dados que enriqueçam e cooperem com a aplicação de camadas de coberturas em aterros sanitários.

Referências

- Agência Embrapa de Informação Tecnológica – AGEITEC (2019). Adubação orgânica. [Http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Adubacao_organica_todos_os_residuosID-zK5PfrF3wp.pdf](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Adubacao_organica_todos_os_residuosID-zK5PfrF3wp.pdf)
- Alcântara, P. B. (2007) *Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco.
- Almeida, A. J. G. A. (2017) *Avaliação do desempenho das camadas de cobertura de aterro sanitário para a redução de emissões de gases de efeito estufa*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas - ABNT (1997) NBR 13896. Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 12p.
- ASTM D5084-10 (2010) *Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter*. American Society for Testing and Materials. Volume 04.08. Soil and Rock (I): D420 - D5876.
- Batista, L. (2014) IPCC aponta mudanças no clima desde 1990. Acervo Estadão, São Paulo, 24 mar. 2014. <https://acervo.estadao.com.br/noticias/acervo,ipcc-aponta-mudancas-no-clima-desde-1990,9868,0.htm>.
- Brasil. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui o Código Civil. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF.
- CETESB. (2018) Potencial de Aquecimento Global de GEE. <https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-empresendimentos/potencial-de-aquecimento-global-de-gee/>
- Costa, M. D. (2015) *Estudos de camadas de cobertura de aterros sanitários em colunas de solos*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco.
- Council of the European Union – CEU. (2018) Paris Agreement on climate change. European Union: CEU, 2018. <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/climate-change/timeline/>
- Gebert, J., Groengroeft, A., & Pfeiffer, E-M. (2011) *Relevance of soil physical properties for the microbial oxidation of methane in landfill covers*. Soil Biology & Biochemistry. 43(9), 1759-1767.
- Gomes, G. J. C. (2017) *Comportamento de misturas de solo e composto orgânico para dimensionamento de camadas de cobertura de depósitos de resíduos sólidos urbanos*. Monografia, Universidade Federal de Pernambuco.
- Gülser, C., Minkina, T., Sushkova, S., & Kizilkaya, R. (2017). *Changes of soil hydraulic properties during the decomposition of organic waste in a coarse textured soil*. Journal of Geochemical Exploration. 174, 66–69.
- Jucá, J. F. T., & Maciel, F. J. (2006). *Gas Permeability of a Compacted Soil Used in a Landfill Cover Layer*. Fourth International Conference on Unsaturated Soils.
- Lira, B. S. (2017) *Uso de composto orgânico como material componente para camada de cobertura oxidativa*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco.
- Lira, B. S., Almeida, A. J. G. A., Gomes, G. J. C., Jucá, J. F. T., Sobrinho, M. A. M., & Mariano, M. O. H. (2020) *Resistência triaxial e ao cisalhamento de misturas de compostos orgânicos e de solo para camadas de cobertura oxidativa de aterro sanitário*. Research, Society and Development, 9(11), 1-17.
- Lopes, R. L. (2011) *Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de Aterros de Resíduos Sólidos*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco.
- Maciel, F. J. (2003) *Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco.
- Maia, J. P. S., Sousa, J. F. M., & Câmara Junior, C. L. (2015) *Avaliação do comportamento físico mecânico de um solo*. Vetor - Revista de Ciências Exatas e Engenharias. 25(1), 57-75.
- Maldaner, L. S. (2011) *Cobertura para oxidação biológica do metano em Aterros de resíduos sólidos urbanos*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo.

- Mariano, M. O. H. (2008) *Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterro de resíduos sólidos*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco.
- Nascimento, E. C., Lafayette, K. P. V., Silva, L. C. L., Bezerra, J. S., & Portela, M. F. A. (2021) *Avaliação do uso do agregado reciclado da construção civil como barreira hidráulica em camadas de coberturas de aterros sanitários*. Research, Society and Development, 10(10), 1-14.
- Oliveira, L. G. (2013) *Estudo das emissões de biogás em camadas de coberturas de aterro de resíduos sólidos urbanos*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco.
- Oliveira Júnior, A. I. (2018) *Comportamento geotécnico de misturas compactadas de solo argiloso com fibras curtas de coco*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco.
- Pedersen, G. B., Scheutz, C., & Kjeldsen, P. (2011). *Availability and properties of materials for the Fakse Landfill biocover*. Waste Management, 31(5), 884–894.
- PROTEGEER. (2018) O que é o ProteGEER? <http://www.protegeer.gov.br/>
- Purificação, R. C. (2009) *Utilização de biocamada metanotrófica como alternativa para redução de emissões de metano por aterros sanitários*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco.
- Santos, G. M. (2015) *Comportamento hidromecânico de solo e das misturas solo-composto utilizados em camadas de cobertura no aterro experimental da Muribeca*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco.
- Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa - SEEG. (2017) Emissões de GEE pelo setor Resíduos. <http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2016/09/FINAL-16-09-13-RelatoriosSEEG-Residuos.pdf>
- USEPA - US Environmental Protection Agency. (2017) Closure and Post-Closure Care Requirements <https://www.epa.gov/landfills/requirements-municipal-solid-waste-landfills-mswfls#groundwater>