UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

RIADNY PATRÍCIA DE SOUZA FERREIRA

ESTUDO GEOAMBIENTAL DE CAMADAS DE COBERTURA UTILIZADAS EM DEPÓSITOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Recife
2019

RIADNY PATRÍCIA DE SOUZA FERREIRA

ESTUDO GEOAMBIENTAL DE CAMADAS DE COBERTURA UTILIZADAS EM DEPÓSITOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Monografia apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá.

Recife

2019

Catalogação na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

F383e Ferreira, Riadny Patrícia de Souza.
Estudo geoambiental de camadas de cobertura utilizadas em depósitos de resíduos sólidos / Riadny Patrícia de Souza Ferreira. – 2019.
45 folhas, il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá.
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2019.
Inclui Referências e Apêndice.

1. Engenharia civil. 2. Camada de cobertura. 3. Oxidação. 4. Aterro sanitário. 5. Grupo de resíduos sólidos. I. Jucá, José Fernando Thomé. (Orientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.). BCTG/2020-19

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL

CANDIDATO: Riadny Patrícia de Souza Ferreira

BANCA EXAMINADORA:
Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá
Examinador 1: Profª. Drª. Maria Odete Holanda Mariano
Examinador 2: MSc. Antônio Italcy de Oliveira Júnior
TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Estudo geoambiental de camadas de cobertura utilizadas em depósitos de resíduos sólidos

LOCAL: Sala 101 – CTG/UFPE
DATA: 16/12/2019 **HORÁRIO DE INÍCIO**: 14:00

Em sessão pública, após exposição de cerca de 30 minutos, o(s) candidato(s) foi (foram) arguido(s) oralmente pelos membros da banca com NOTA: _____(deixar 'Exame Final', quando for o caso).
1) ( ) aprovado(s) (nota > = 7,0), pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito.
As revisões observadas pela banca examinadora deverão ser corrigidas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias (o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).
O trabalho com nota no seguinte intervalo, **3,0 = < nota < 7,0,** será reapresentado, gerando-se uma nota ata; sendo o trabalho aprovado na reapresentação, o aluno será considerado **aprovado com exame final**.
2) ( ) reprovado(s). (nota <3,0)

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelo(s) candidato(s).

Recife, 16 de dezembro de 2019.

Orientador: .....

Avaliador 1: .....

Avaliador 2: .....

Candidato 1: .....

AGRADECIMENTOS

Ao meu Melhor amigo, Conselheiro e Consolador que esteve, está e continua sendo a minha força em toda a trajetória da vida: Deus.

À Mainha que cuida de mim como ninguém e nunca me deixou desistir. Obrigada por sempre dizer que eu conseguiria e por entender meus longos períodos no computador.

Ao meu orientador Jucá, pelo incentivo, credibilidade, contribuição no desenvolvimento do meu potencial profissional.

À professora Odete, que me ensinou tanto ao longo da graduação e formou boa parte do meu conhecimento de projetos e pesquisa.

A Cicero Vitor que foi minha companhia constante, ajuda nas horas difíceis e parceiro para a jornada tanto da vida, das disciplinas quanto da finalização da graduação. Obrigada por tudo.

Aos amigos que estão comigo desde o início da graduação, me viram nas mais diversas variações de humor e preferiram ficar. Muito obrigada Cecília, Assaka, Ingrid, Samuel, Hector e Rodrigo.

Aos que sustentaram muitas vezes o meu sorriso, foram ajuda nas dúvidas com as disciplinas e foram companheiros nas situações ruins. Obrigada Matheus, Takeshi, Luciana, João, Renato e Natália.

À Camila e Italcy, em especial, que me aconselharam e ajudaram em várias dúvidas que surgiram e foram companheiros nessa jornada de pesquisador, que eu só estou começando.

Aos professores que me inspiraram durante a graduação por ensinar com amor, cuidado e responsabilidade. Muito obrigada Roberto Azevedo, Sylvana Santos, Leidjane Oliveira, Débora Parisi, Bernardo Horowitz, Paulo Sousa, Washington Amorim, Antônio Nunes, Gisele Carvalho, Sadi Seabra, Maurício Pina, Fernando Jordão...

RESUMO

Desde a promulgação, em 2010, da Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos (doravante PNRS), a responsabilidade ambiental quanto à extinção dos lixões no território nacional se tornou uma meta a ser alcançada. A forma adotada para que os resíduos, diferentemente do que ocorre nos lixões, seja disposto sem contaminação, foi a implantação de aterros sanitários. No funcionamento do aterro, as camadas de resíduos são intercaladas com solo e finalizadas – no topo – com solo impermeável para evitar a geração de lixiviado e emissão de gases poluentes. A camada do topo é definida como camada de cobertura e tem sido estudada a fim de melhorar seu desempenho de estanqueidade de gases e líquidos. 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 que melhora o desempenho da oxidação das bactérias metanotróficas e da barreira física impermeável. E, quanto a 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: Camada de cobertura. Oxidação. Aterro sanitário. Grupo de resíduos sólidos.

ABSTRACT

Since the enactment, in 2010, of the National Solid Waste Policy Act (hereinafter PNRS), environmental responsibility for the disposal of garbage dumps in the national territory has become a goal to be achieved. The way adopted for the waste, unlike what occurs in dumps, to be disposed of without contamination, was the implementation of landfills. In the operation of the landfill, the waste layers are interspersed with soil and finalized - at the top - with impermeable soil to prevent leachate generation and emission of polluting gases. The top layer is defined as the cover layer and has been studied in order to improve its gas and liquid tightness performance. In the course of research, the oxidative cover layer has become a viable alternative to reduce greenhouse gas (GHG) emissions. For this reason, a bibliographic review of 11 studies carried out with this theme in the Solid Waste Group (GRS) was made, being the monograph, dissertation and thesis, from 2003 to 2019 and a correlation of national and international research data. 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 increased water retention capacity that improves the oxidation performance of methanotrophic bacteria and the waterproof physical barrier. And as for compaction, the addition of organic matter indicates greater ease in compaction of the mixture. The studies indicated, in addition to the consistency of the results for landfill application and its oxidative potential, the need to add parameters in the analysis to better support current and future research.

Keywords: Cover layer. Oxidation. Landfill. Solid waste group.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Linha histórica de eventos relacionados às emissões..... 11
Figura 2 – Coleta e processamento com múltiplos usos do gás do aterro sanitário..... 15
Figura 3 – Disposição final de RSU no Brasil por tipo de destinação (toneladas/dia).... 17
Figura 4 – Disposição final de RSU coletados no Brasil (toneladas/ano)..... 17
Figura 5 – Esquema de um aterro sanitário..... 18
Figura 6 – Esquema da camada de cobertura convencional..... 22
Figura 7 – Esquema da camada evapotranspirativa..... 23
Figura 8 – Esquema da camada oxidativa..... 23
Figura 9 – Curvas características de alguns trabalhos..... 33
Figura 10 – Emissão de gases na camada oxidativa ao longo do tempo..... 35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Trabalhos estudados..... 26
Tabela 2 – Composição e classificação dos materiais..... 28
Tabela 3 - Resultados da compactação dos materiais..... 30
Tabela 4 – Permeabilidades ao ar e à água..... 32
Tabela 5 – Valores médios para desempenho dos materiais..... 36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RSU	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
GEE	GASES DO EFEITO ESTUFA
PGRS	PLANO DE GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS
IPCC	INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE
GRS	GRUPO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
IP	ÍNDICE DE PLASTICIDADE

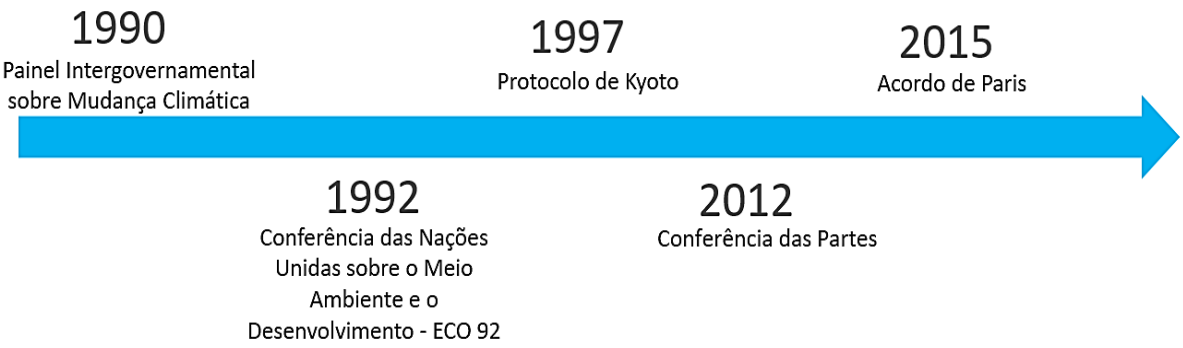
SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	11
1.1	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO.....	13
1.2	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS.....	13
2	**REFERENCIAL TEÓRICO**.....	15
2.1	VISÃO GERAL DA DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS.....	15
2.2	ATERROS SANITÁRIOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	18
2.3	CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	19
2.3.1	**Camada de cobertura convencional**.....	21
2.3.2	**Barreira capilar ou evapotranspirativa**.....	22
2.3.3	**Camada de cobertura oxidativa ou biorreativa**.....	23
3	**MATERIAIS E MÉTODOS**.....	26
3.1	LEVANTAMENTO DE DADOS.....	26
3.2	ANÁLISE DE DADOS.....	26
3.2.1	**Composição e classificação dos materiais**.....	26
3.2.2	**Curva de compactação**.....	27
3.2.3	**Ensaios de permeabilidade vertical ao ar e à água**.....	27
4	**RESULTADOS E DISCUSSÕES**.....	28
4.1	COMPOSIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS.....	28
4.2	CURVA DE COMPACTAÇÃO.....	30
4.3	ENSAIOS DE PERMEABILIDADE VERTICAL AO AR E À ÁGUA.....	32
4.4	CONDIÇÕES ÓTIMAS PARA COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS.....	35
4.5	PARÂMETROS CONDICIONANTES PARA MELHORIA DA OXIDAÇÃO DAS CAMADAS DE COBERTURA.....	36
5	**CONCLUSÕES**.....	38
	REFERÊNCIAS.....	39
	APÊNDICE A – TRABALHOS REALIZADOS PELO GRS – GRUPO DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	44

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)

Figura 1 – Linha histórica de eventos relacionados às emissões



Fonte: A Autora (2019).

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 (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 composto 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 subdivido 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 CH_4 quimicamente em CO_2 e água.

1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Desde a promulgação da Lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010), os órgãos ambientais dos respectivos municípios têm-se envolvido inicialmente a fim de inserir e serem responsáveis por um Plano de Gerenciamento dos Resíduos Sólidos. Com isso, a produção dos resíduos pode ser setorizada e a destinação final ser realizada minorando os danos ambientais e com o melhor aproveitamento possível. A influência da implantação do Plano abrange tanto a destinação inadequada como também a não-separação entre materiais putrescíveis e recicláveis que, atualmente, têm causado a degradação biológica gerando gases poluentes.

Além disso, após a busca por meios de melhor destinar o lixo até com o uso de aterros sanitários, necessidades como o cobrimento dos resíduos eficiente e a preocupação com a emissão de gases do efeito estufa vieram à tona. Dessa forma, houve um aumento nas pesquisas para definir uma camada de cobertura ótima – utilizando os materiais disponíveis nas jazidas – capaz de realizar oxidação do gás metano.

Considerando os crescentes dados mundiais de emissões gasosas na atmosfera e as mobilizações internacionais para mitigar os danos, a implantação de camadas de cobertura oxidativas apresenta-se como uma opção cooperativa. O Brasil, em 2015, apresentou uma redução de 50% da emissão de GEE comparado com o ano de 2005 (MCTIC, 2018). Apesar dos lixões e aterros sanitários emitirem taxas de CH_4 inferiores aos de CO_2 – um valor equivalente a 49 milhares de toneladas de CO_2eq (SEEG, 2018) através de outros setores da sociedade, os valores aferidos contabilizam conjuntamente.

Logo, o seguinte trabalho tem a finalidade de cooperar com a pesquisa atual e proporcionar praticidade na procura de dados no âmbito das camadas de cobertura para aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.

1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

Elaborar uma revisão bibliográfica de dados do Grupo de Resíduos Sólidos sobre camadas de coberturas oxidativas comparados com pesquisas nacionais e internacionais. Sendo realizado com os seguintes objetivos específicos:

- Comparar os dados das classificações do solo, curvas de compactação e permeabilidade ao ar e à água com a literatura;
- Propor condições ótimas para a composição de materiais considerando as informações dos trabalhos anteriores;
- Listar os parâmetros condicionantes para a melhoria da oxidação das camadas de cobertura de aterros sanitários;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

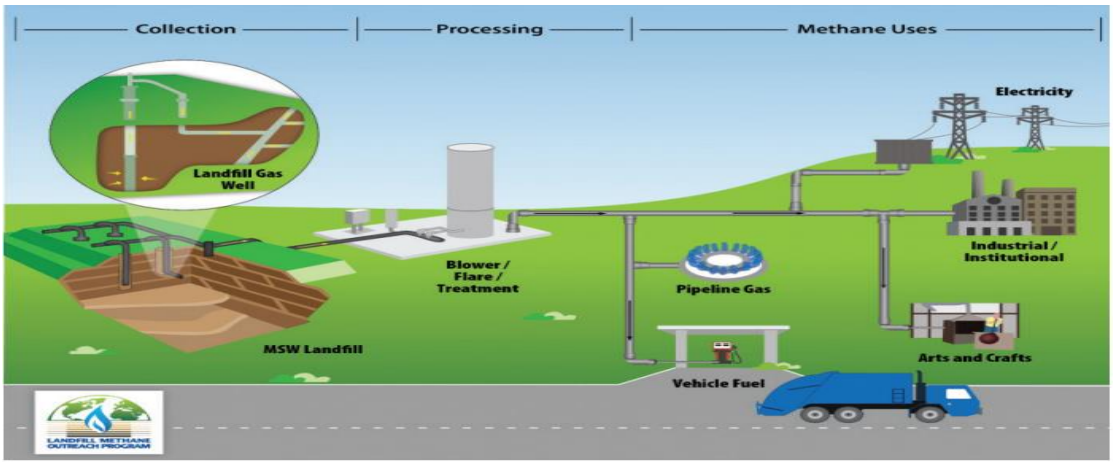
Concentrando conhecimentos gerais e específicos sobre os conteúdos, este tópico descreve os conteúdos diretamente relacionados ao título como uma sequência crescente de importância de informações.

2.1 VISÃO GERAL DA DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS

Nos Estados Unidos, Europa e Japão, a disposição de resíduos sólidos é regida com dedicação e investimento. Os americanos propuseram uma meta de - até 2020 - reduzir a zero a quantidade de resíduos destinados a aterros sanitários. Já na maior parte da Europa, o método de digestão anaeróbia é o mais utilizado e, no Japão, a incineração - gerando energia elétrica e com devido cuidado na destinação das cinzas - é a forma mais utilizada para tratamento dos seus resíduos. (SENADO FEDERAL, 2018; GRS, 2017)

Nos Estados Unidos, de acordo com a NWRA - Nacional Waste & Recycling Association (2019), o gás de aterro sanitário, em sua composição, corresponde a 50% de metano ou gás natural, permitindo que seja usado para abastecer veículos, criar energia para instalações de fabricação e gerar eletricidade para residências e escritórios, como ilustra a Figura 2. Por esse motivo, o órgão costuma desenvolver treinamentos para que todos os que irão gerir os aterros tenham competência necessária e eficaz para monitorar e garantir o bom funcionamento do mesmo. É importante destacar que os Estados Unidos – que já teve 19 mil lixões, hoje encerrados – conseguem administrar um número que foi reduzido, entre 1988 e 2014, de 1.956 aterros sanitários, consolidando o uso de aterros sanitários regionais. (ABDIB, 2019)

Figura 2 – Coleta e processamento com múltiplos usos do gás do aterro sanitário



Fonte: Waste Recycling (2018).

Já na União Europeia, a dinâmica da gestão dos resíduos abrange a ideia de reduzir ao máximo a quantidade de resíduos para que, se possível, não seja necessário descartá-lo. Atrelado a isso, o Europe 2020 Strategy (EC, 2019) propõe a redução de 20% das emissões de gases em comparação com 1990, aumentando a taxa do consumo de energia da EU (European Union) produzido a partir de recursos renováveis para 20% e uma melhoria de 20% na eficiência energética da EU (ou consumo de energia reduzido), até 2020.

A União Europeia tem, como propostas em relação aos biorresíduos, a eliminação progressiva dos aterros sanitários até 2025, a reciclagem e preparação para reutilização de RSU serão aumentadas para 70% até 2030, medidas para reduzir geração de resíduos alimentares em 30% até 2025 e introdução da coleta seletiva dos biorresíduos. (EC, 2020)

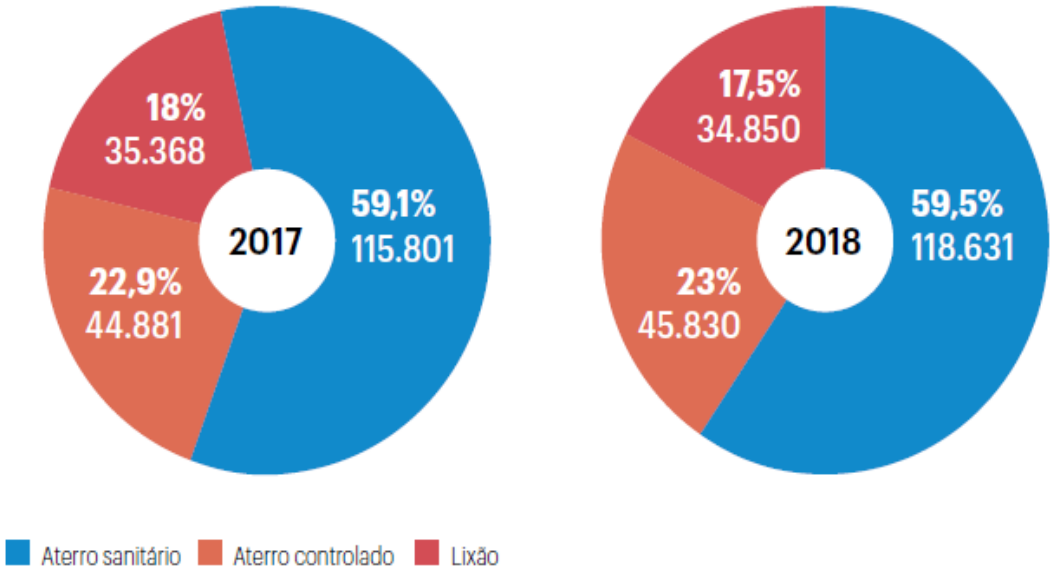
Em 2019, em uma reunião do IPCC, o Prefeito de Kyoto, Daisaku Kadokawa afirmou que, com o objetivo de zero emissões líquidas de GEE, a cidade conseguiu – no intervalo de 2006 a 2019 - reduzir o volume de resíduos de 820.000 toneladas para 410.000 toneladas em parceria com a população. Os meios de transporte foram gradualmente transferidos de carros particulares para o transporte público, cuja participação aumentou em 30%. O *"Do you Kyoto?"* agora é conhecido em todo o mundo como um slogan que incentiva as pessoas a tomarem ações ecológicas. (IPCC, 2019)

No Brasil, a partir da criação da Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010) da Política Nacional de Resíduos Sólidos, foi proposto a criação de um PGRS (Programa de Gerenciamento de Resíduos Sólidos) por município. O programa visa instituir a reorganização do tratamento, melhoria na destinação dos resíduos e extinção de lixões. Consequentemente, a emissão de gases do efeito estufa (GEE) voltou a ser alvo de análise, devido a necessidade de mitigação e da mobilização internacional a fim de atingir essa meta.

Segundo Sardi e Ceccherini (2017), anualmente, 30 milhões de toneladas de lixo estão em lixões e aterros irregulares, dispostos sem tratamento, contaminando o solo e lençol freático. Considerando que, desde 2010, apenas 40% dos municípios eliminaram os lixões, foi planejado que a Lei tivesse uma prorrogação condicional ao porte dos municípios. De acordo com o planejado, para Capitais e Regiões Metropolitanas, o prazo seria prorrogado até 31 de julho de 2018 e, para cidades com menos de 50 mil habitantes, até 31 de julho de 2021.

O problema, muitas vezes, consiste na falta de consciência ambiental da população e da seriedade no cumprimento das leis das empresas reguladoras. Onde é possível ver os resíduos dispostos em locais inadequados – antes mesmo da equipe de coleta e/ou com a presença de lixeiros – e da protelação dos responsáveis no cumprimento dos prazos das políticas públicas estabelecidas.

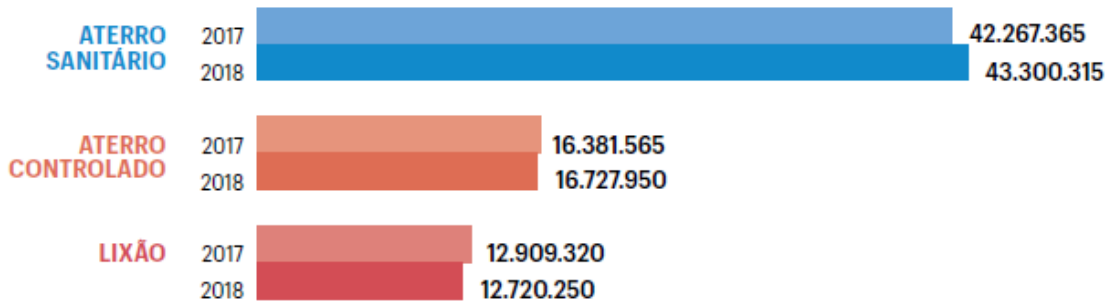
Figura 3 – Disposição final de RSU no Brasil por tipo de destinação (toneladas/dia)



Fonte: ABRELPE (2018).

De acordo com as Figuras 3 e 4, é possível ilustrar o avanço – ainda que vagaroso – da redução do uso de lixões e o crescimento dos aterros sanitários no Brasil. Apesar disso, ainda existe um número considerável de toneladas levadas para aterros controlados, que não garantem a integridade do subsolo e podem provocar contaminação do lençol freático. Apesar disso, de acordo com um relatório da ABRELPE (2018), o volume da coleta cresceu mais do que a geração dos resíduos em todo Brasil, com exceção do Nordeste em que houve redução da população no intervalo de 2017 e 2018.

Figura 4 – Disposição final de RSU coletados no Brasil (toneladas/ano)



Fonte: ABRELPE (2018).

2.2 ATERROS SANITÁRIOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

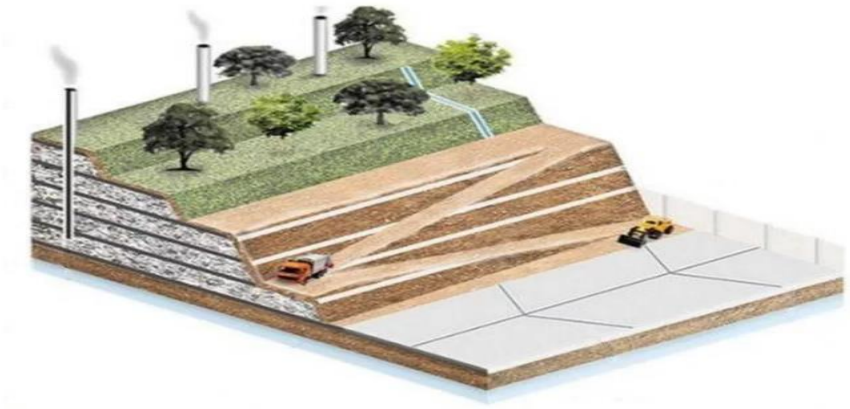
De acordo com a NBR 8419 (ABNT, 1992), aterro sanitário é definido como:

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

A partir da aprovação da Política Nacional dos Resíduos Sólidos, a questão da destinação dos resíduos teve destaque quanto às metas estipuladas. A Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010) designou como meta a erradicação dos lixões e propondo como alternativa a implantação de aterros sanitários. A contaminação dos aquíferos por ausência de impermeabilização da base dos lixões e danos à saúde da população e catadores – no local - pelo ambiente insalubre são dois problemas que, com urgência, devem ser sanados com a observância da Lei.

Após proporcionar condições saudáveis à vizinhança e visando a continuidade do aterro sanitário, o cuidado com a emissão de gases dos resíduos deve ter prioridade. Devido às reações entre os micro-organismos e a matéria orgânica do lixo, há produção do gás metano (CH_4) que, quando não captado pelos *flares* – mecanismo vertical de queima dos gases provenientes do lixo, contamina a atmosfera. Segundo Van Elk (2007), o CH_4 contribui para o aquecimento global 21 vezes mais do que o gás carbônico (CO_2) e, o *flare* – como ilustra a Figura 5 - funciona como filtro ao transformar o metano em gás carbônico e água através da combustão espontânea.

Figura 5 – Esquema de um aterro sanitário



Fonte: GLOBO (2019).

Segundo Costa (2015), os locais em que os aterros estão localizados armazenam grandes volumes de resíduos e abrangem grandes áreas das cidades. Devido ao custo e aos riscos associados com o tratamento ou a remoção desses resíduos que estão confinados, é necessário a construção de uma cobertura para os resíduos, para que esta seja a ligação do interior dos resíduos com o ambiente. Sendo assim, para evitar que águas pluviais infiltrem no interior do aterro e que não haja a emissão de gases para atmosfera, são construídas camadas de coberturas que utilizam o conhecimento da engenharia de solos nos seus projetos, prevenindo assim, os danos ao meio ambiente.

2.3 CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

As camadas de cobertura finais funcionam como barreira impedindo o contato com vetores e meio ambiente, além de ajudar na impermeabilização do fluxo descendentes - de líquido para massa de lixo - e ascendentes - do gás metano.

A eficiência dos sistemas de cobertura final de aterros sanitários destaca-se na avaliação do comportamento dessas obras, uma vez que pode afetar inúmeros aspectos do seu desempenho. A cobertura final pode variar conforme as características geotécnicas do material utilizado e de acordo com as características climatológicas da região onde o aterro se encontra instalado. Faz-se necessário, por sua vez, o entendimento e o estudo dessas características para que se tenha a segurança e a eficiência desejada no projeto de sistemas de cobertura. Tais características são ainda pouco estudadas devido à complexidade do fenômeno de interação entre o solo, atmosfera e resíduos (CATAPRETA, 2008).

Os métodos preexistentes para proporcionar impermeabilidade dos lixiviados nas camadas dos aterros já não eram o suficiente para o proposto pela Lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010). A implantação de camadas de cobertura capazes de oxidar os teores de metano (CH_4) - de forma eficiente - tornou-se uma boa técnica para o meio ambiente, promovendo mais um benefício: redução de gases reguladores do efeito estufa.

Para avaliação da proporção dos componentes das camadas é primordial o conhecimento acerca dos fatores que mais influenciam a geração de biogás em aterros de resíduos sólidos, são eles:

> a) Geometria do aterro: a altura da massa de resíduos e o sistema de cobertura final, que podem sofrer mais ou menos influência das condições atmosféricas.
>
> b) Composição dos resíduos: A composição afeta quantitativamente e qualitativamente a produção dos gases. A disponibilidade de frações mais facilmente degradáveis (carboidratos, proteínas e lipídios) significa uma maior quantidade de substrato para a atuação de microrganismos, desta forma, os resíduos com grande presença de matéria orgânica devem apresentar um maior potencial de biogás.
>
> c) Variáveis do ambiente interno: capacidade de favorecimento ou inibição das atividades bacterianas e a variação dos condicionantes externos são ocasionadas, principalmente, pela entrada de O_2 para o interior da massa de resíduos, que ocorre tanto na forma dissolvida, pelas águas pluviais que infiltram pelo sistema de cobertura, quanto na forma de gás devido ao aumento da pressão atmosférica local. (MACIEL, 2003 *apud* OLIVEIRA, 2013)

Além disso, vale salientar sobre as intempéries as quais as camadas de coberturas são submetidas em campo. Neste caso, mais especificamente acerca da fissuração por ressecamento mesmo sendo caracterizadas como argilosas. Isso acontece, por exemplo, em camadas de cobertura evapotranspirativas, pois, ela não funciona como uma barreira impermeável, mas como um reservatório que armazena umidade durante ocorrências de chuva, liberando-a, em seguida, de volta à atmosfera por evapotranspiração ou drenagem lateral (ZORNBERG e MCCARTNEY, 2003).

Segundo Oliveira (2013), quando surgem as fissuras, há grande probabilidade de suceder o fenômeno de contração das camadas do material argiloso. Isso ocorre com influência das condições climáticas e pelas variações de umidade do solo, de forma periódica. Podendo-se observar um crescente na percolação através da camada após o surgimento dessas ranhuras no solo.

Por esse motivo, diversas pesquisas têm sido feitas utilizando simulações em sistemas de colunas com a finalidade de investigar a melhor composição e proporção dos solos nas camadas de cobertura. A análise abrange ensaios geotécnicos, químicos, microbiológicos além da injeção do gás para avaliar o comportamento do solo.

A camada em foco neste estudo é denominada como metanotrófica, biorreativa ou oxidativa - com capacidade de oxidação do fluxo de metano. Também existe a camada convencional a qual consiste numa camada única de material com baixa condutividade hidráulica e utilização de geossintéticos para impermeabilização do topo, bem como a evapotranspirativa.

Apesar de, segundo Mariano (2008), a norma não especificar espessura, tipo e características geotécnicas do solo a ser utilizado, quanto à permeabilidade, segundo USEPA (2017) e a norma NBR 13896 (ABNT, 1997), exige-se um valor de permeabilidade abaixo de 10^{-7}m/s.

Segundo Araújo (2014), para um sistema de camadas de cobertura, existem algumas recomendações que devem ser seguidas pois a camada necessita de acompanhamento geotécnico e climatológico. Saarela (1997) descreve as partes da estrutura de um sistema de cobertura de resíduos nos aterros, divididos - de acordo com suas funções - em:

- Camada de controle de gás: Conduz os gases produzidos pelos resíduos, originados pela biodegradação da matéria orgânica, para a atmosfera.
- Camada filtrante: Separa o material fino dos grossos a fim de evitar o entupimento da parte de granulometria grossa pelos finos. Prevenindo, assim, a mistura dos materiais de diferentes camadas.
- Camada de proteção inferior: Isola a barreira hidráulica dos resíduos e serve como suporte para as demais camadas. Também impede danos químicos e mecânicos que a massa de lixo pode provocar na barreira hidráulica.
- Barreira hidráulica: Desvia ou impede que a percolação de qualquer forma de precipitação entre em contato com a massa de lixo. É importante que ela não sofra danos causados por raízes de plantas ou pela presença de animais, para não perder sua função.
- Camada drenante: Detém a percolação de precipitação, conduzindo-a lateralmente para fora do sistema em pontos de descarte seguros.
- Barreira biótica: Evita o dano das camadas inferiores pelas raízes da vegetação e pela presença de animais, particularmente a barreira hidráulica.
- Camada superficial: Previne a erosão através da vegetação, que expele a água do sistema de cobertura pela evapotranspiração, bem com melhorar o paisagismo.

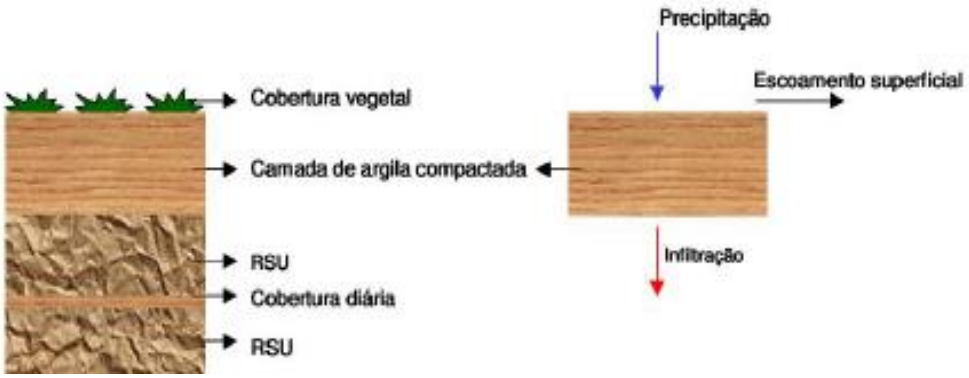
2.3.1 Camada de cobertura convencional

A camada de cobertura convencional – ilustrada a seguir na Figura 6 - é desenvolvida através da utilização isolada de solo natural argiloso compactado acima da massa de lixo.

Estas camadas de cobertura costumam apreender atenção no tocante à estabilidade do seu arranjo devido às intempéries as quais é exposta. A estrutura de um solo fino sofre variações mais facilmente a cada mudança de temperatura unida à oscilação de umidade. Dessa forma, surgem problemas quanto às fissuras que, ao contrário da função original, dá início às emissões fugitivas de gases e caminhos preferenciais para infiltração de líquidos.

Mesmo que o desempenho de camadas de cobertura confeccionadas com solos argilosos em climas úmidos possa ser satisfatório, Zornberg *et al* (2003) destaca que em regiões áridas, esse tipo de sistema não funciona adequadamente. Os autores embasaram sua afirmação na formação de fissuras na camada, pois o monitoramento revelou que, com o decorrer do tempo, ocorreram modificações significativas nos principais aspectos que afetam a eficiência da camada de cobertura e que os parâmetros iniciais de projeto não foram mantidos, inferindo, portanto, no aumento do custo de manutenção desses aterros.

Figura 6 - Esquema da camada de cobertura convencional



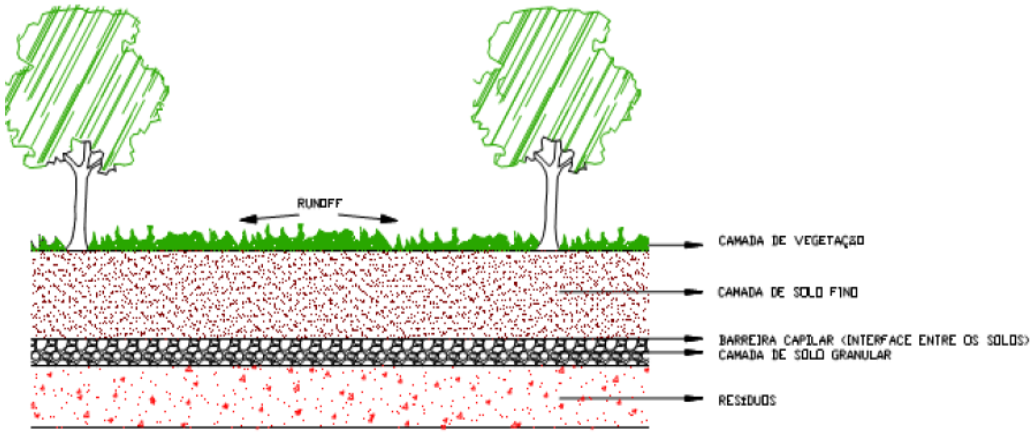
Fonte: MARIANO (2008).

2.3.2 Barreira capilar ou evapotranspirativa

Tal método é aplicado utilizando mecanismos da evapotranspiração e granulometria dos solos. A barreira capilar funciona com a utilização de camadas de solo com dimensões de grãos menores sobrepondo os de grãos maiores com a finalidade de aumentar a capacidade de retenção de água daquele de menor granulometria.

A camada de vegetação inserida na camada mais externa tem a função de garantir a absorção de água e armazenamento na camada de solo fino. Dessa forma, a camada mais interna encontra-se segura quanto às infiltrações. Na Figura 7 é possível visualizar um esquema:

Figura 7 - Esquema da camada evapotranspirativa



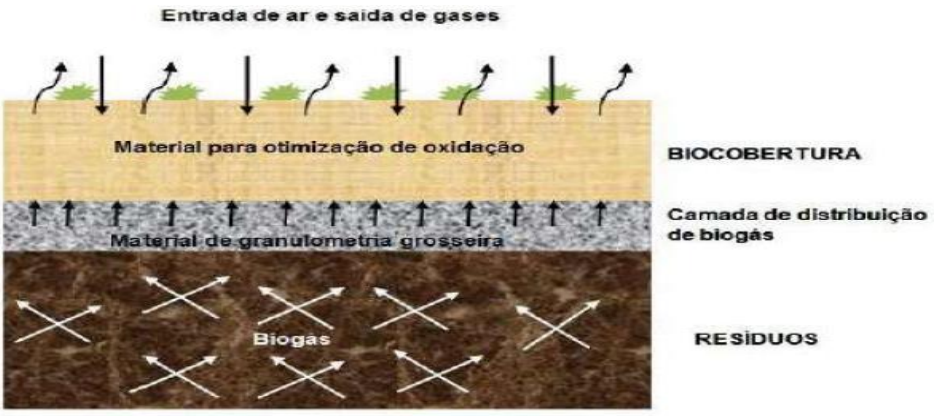
Fonte: CATAPRETA (2008).

Este tipo de cobertura é mais adequado em locais de clima árido, devido a capacidade de armazenamento de água no solo ser limitada. Em locais com altos teores de precipitação, o mecanismo não satisfaz aos critérios de infiltração de líquidos, causando taxas excessivas para a massa de resíduos (LOPES, 2011).

2.3.3 Camada de cobertura oxidativa ou biorreativa

As camadas de coberturas oxidativas – ilustrada na Figura 8 - surgiram a partir da ideia sustentável de aproveitar materiais de forma a proporcionar oxidação de gases inerentes de aterros sanitários. Como o gás metano possui teor de perigo estimado de 21 vezes maior que o gás carbônico, o foco da idealização da camada foi agir para redução dessas emissões, preservando a atmosfera.

Figura 8 - Esquema da camada oxidativa



Fonte: LOPES (2011).

Um dos métodos que pode ser aplicado para o controle de emissão de gases pela camada de cobertura é a utilização de potencial microbiológico residente no solo de cobertura para realizar a oxidação do metano. Segundo Rose (2009), embora este método não reduza o volume de biogás que passa por essa camada, ele ao menos minimiza os efeitos danosos ao ambiente, provocados pela liberação em grandes quantidades de CH_4.

O que motiva a execução de camadas de cobertura alternativas são as singularidades locais como clima, disponibilidade de solos naturais argilosos – reduzindo o consumo do solo natural e sendo solução quando há poucas jazidas - e custo, por exemplo. Dessa forma, os projetos de camadas de cobertura alternativas são executados de forma específica e fazem uso de materiais diversos como: misturas de solos naturais com bentonita, materiais plásticos, papéis e compostos orgânicos (MARIANO, 2008).

Com o fluxo ascendente do gás na camada de lixo, há possibilidade de fuga desse gás – não assimilado na queima pelo *flare* – pela camada de cobertura. Com o funcionamento de oxidação incluído na camada, a emissão do metano pode ser reduzida e, com otimização, cessada.

Para a utilização do material, o composto orgânico deve estar estabilizado e dentro de condições para que os micro-organismos atuem na oxidação do gás. Assim, de acordo com Costa (2015), o produto compostado para ser misturado com o solo, deve encontrar-se estabilizado, evitando assim, a geração de danos ao solo interferindo na biota residente com a produção de toxinas. Além disso, caso não esteja estabilizado, poderá alterar as propriedades da mistura, interferindo nos resultados dos parâmetros de permeabilidade, compressibilidade e resistência.

Para que a camada oxidativa seja eficiente quanto à oxidação dos gases, é primordial a realização de uma análise de cada atributo do solo escolhido. Alguns aspectos geotécnicos estão descritos a seguir:

1. Permeabilidade: parâmetro diretamente ligado à capacidade do metano ser oxidado pela camada oxidativa, como também quanto ao fluxo de líquidos externos percolando no solo;
2. Resistência ao cisalhamento: analisando o movimento contínuo por transporte do lixo no aterro sanitário, o desempenho do solo diante das cargas aplicadas;

3. Umidade: de acordo com o ambiente que o solo é exposto, a porcentagem de líquido no meio interfere na reação oxidativa nos gases. Além de, segundo Maciel (2003), aumentar a geração de gases no meio no processo de biodegradação;
4. Compressibilidade: importante devido à exposição da camada às cargas dos veículos que compactam as camadas de resíduos;
5. Sucção: capacidade do solo de promover retenção de líquido em seu interior, proporcionando maior estanqueidade na camada.
6. Compactação: para que a umidade ótima persista auxiliando na estabilidade e na biodegradação do solo abaixo da camada, o solo precisa estar na faixa de grau de compactação adequada para melhorar seu desempenho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este item se dedica à descrição mais detalhada possível da forma que a pesquisa foi realizada a fim de que possa ser reproduzida por qualquer consultor do trabalho.

3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

As teses, dissertações e trabalhos de conclusão de curso usadas como base foram acessadas através do site do Grupo de Resíduos Sólidos, 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 outros; utilizando *landfill layer*, *methane oxidation* e *permeability landfill layer* como palavras-chaves. Os trabalhos escolhidos tinham em comum os ensaios e/ou parâmetros escolhidos pela autora onde a identificação dos autores e ano dos trabalhos seguem na Tabela 1.

Tabela 1 – Trabalhos estudados

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

Fonte: A Autora (2019).

3.2 ANÁLISE DE DADOS

Este item irá se subdividir descrevendo os parâmetros pelos quais serão baseados a análise após o levantamento dos dados.

3.2.1 Composição e classificação dos materiais

De acordo com a literatura e resultados obtidos, o comportamento da camada de cobertura será avaliado a fim de fazer comparações entre solos e 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.

3.2.2 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.

3.2.3 Ensaios de 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 as Equações 1 e 2 a seguir:

$$\mathrm{Ksat} = \frac{\mathrm{V} \times \mathrm{L}}{\Delta\mathrm{P} \times \mathrm{t} \times \mathrm{Acp}}$$

Eq.1

K_{sat} = coeficiente de permeabilidade à água (m/s)

V = Volume do líquido percolado (m^3)

L = Altura do corpo de prova (m)

ΔP = Variação da carga de pressão (m)

t = Tempo necessário para percolar o volume de 5 ml (s)

A_{CP} = Área do corpo de prova (m^2)

$$\mathrm{Kint} = \frac{2 \times \mathrm{v} \times \mu \times \mathrm{L} \times \mathrm{Ps}}{(\mathrm{Pe}^2 \times \mathrm{Ps}^2)}$$

Eq.2

K_{int} = Permeabilidade intrínseca do fluido (m^2)

v = Velocidade de percolação do fluido (m/s)

μ = viscosidade dinâmica do ar (Pa.s)

L = comprimento da amostra (m)

P_e = Pressão de entrada (Pa)

P_s = Pressão de saída (Pa)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o levantamento e análise dos dados, o item tem a finalidade de apresentar as correlações e resultados consonantes com os objetivos propostos inicialmente.

4.1 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, Sousa e Câmara Junior (2015), ilustra a forma que o solo irá se comportar na variação de umidade. Alguns IP's foram arredondados pondo um padrão de números significativos.

Tabela 2 – Composição e classificação dos materiais

Material utilizado	Class.	IP (%)	$\gamma_{grãos}$ (g/cm³)	Referência
Solo da jazida da Muribeca	CH	30	2,63	Maciel (2003)
Solo da jazida da Muribeca	MH	19	2,65	Alcântara (2007)
Solos da jazida de Aguazinha	SC	15	-	Mariano (2008)
	CL	17	-	
Solo da jazida da Muribeca	CH	27	2,67	Purificação (2009)
Solo e composto (3:1)	MH	18	2,51	
Solo 1 da jazida da Muribeca	ML	13	2,62	Lopes (2011)
Solo 2 da jazida da Muribeca	ML	13	2,63	
Solo 1 e composto (1:1)	MH	12	2,45	
Solo 2 e composto (3:1)	MH	17	2,53	
Solo 1 da jazida da Muribeca	ML	14	2,66	Oliveira (2013)
Solo 2 da jazida da Muribeca	ML	14	2,65	
Solo 1 e composto (1:1)	ML	11	2,62	
Solo 2 e composto (3:1)	ML	13	2,59	
Solo puro da Muribeca	ML	17	2,72	Costa (2015)
Solo e composto (1:1)	ML	11	2,57	
Solo puro de Muribeca (1)	ML	13	2,72	Lira (2017), Gomes (2017) e Almeida (2017)
Solo puro de Caruaru (2)	SM	7	2,83	
Solo 1 e composto (1:1)	SM	10	2,54	
Solo 2 e composto (1:1)	SM	3	2,58	

Material utilizado	Class.	IP (%)	$\gamma_{grãos}$ (g/cm³)	Referência
Solo puro sem fibra de coco	CL	18	2,62	Oliveira Júnior (2018)

Fonte: A Autora (2019).

Legenda: CH – Argila de alta compressibilidade; MH – Silte de alta compressibilidade; SC – Areia Argilosa; CL – Argila de baixa compressibilidade; ML - Silte de baixa compressibilidade; SM – Areia Siltosa.

De acordo com a 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.

Segundo Pedersen *et al* (2011), a utilização de materiais mais porosos tende a causar uma maior taxa de emissão de CH_4 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, Sousa e Câmara Junior (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).

4.2 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, consequentemente, 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.

Tabela 3 – Resultados da compactação dos materiais

Material utilizado	$\gamma_{máx}$ (g/cm³)	$\omega_{ótima}$ (%)	Referência
Solo da jazida da Muribeca	1,61	23,0	Maciel (2003)
Solo da jazida da Muribeca	1,59	20,0	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	19,0	
Solo 1 da jazida da Muribeca	1,61	19,9	Lopes (2011)
Solo 2 da jazida da Muribeca	1,61	19,0	
Solo 1 e composto (1:1)	1,30	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	20,0	Costa (2015)
Solo e composto (1:1)	1,42	26,0	

Material utilizado	$\gamma_{máx}$ (g/cm³)	$\omega_{ótima}$ (%)	Referência
Solo puro de Muribeca (1)	1,66	20,0	Lira (2017), Gomes (2017) e Almeida (2017)
Solo puro de Caruaru (2)	1,93	12,8	
Solo 1 e composto (1:1)	1,39	26,0	
Solo 2 e composto (1:1)	1,44	23,0	
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: A Autora (2019).

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. 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.

4.3 ENSAIOS DE PERMEABILIDADE VERTICAL 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.

Tabela 4 – Permeabilidades ao ar e à água

Material utilizado	K_{AR} (m/s)	$K_{ÁGUA}$ (m/s)	Referência
Solo da jazida da Muribeca	$1,5\times10^{-9}$	-	Maciel (2003)
Solo da jazida da Muribeca	1×10^{-9}	$1,1\times10^{-8}$	Alcântara (2007)
Solos da jazida de Aguazinha	10^{-6} a 10^{-8}	10^{-6} a 10^{-8} 10^{-8} a 10^{-9}	Mariano (2008)
Solo da jazida da Muribeca	$6,62\times10^{-7}$	-	Purificação (2009)
Solo e composto (3:1)	$5,75\times10^{-7}$	-	
Solo 1 da jazida da Muribeca	4×10^{-8}	$1,5\times10^{-9}$	Lopes (2011)
Solo 2 da jazida da Muribeca	$2,2\times10^{-7}$	$4,4\times10^{-8}$	
Solo 1 e composto (1:1)	$2,3\times10^{-5}$	$2,8\times10^{-6}$	
Solo 2 e composto (3:1)	$3,2\times10^{-7}$	$9,2\times10^{-8}$	
Solo 1 da jazida da Muribeca	$3,6\times10^{-4}$	$1,3\times10^{-7}$	Oliveira (2013)
Solo 2 da jazida da Muribeca	-	-	
Solo 1 e composto (1:1)	-	-	
Solo 2 e composto (3:1)	-	-	
Solo puro da Muribeca	$3\text{-}5\times10^{-9}$	$4,2\times10^{-9}$	Costa (2015)
Solo e composto (1:1)	$6\text{-}8,5\times10^{-9}$	$1,9\times10^{-9}$	

Material utilizado	K_{AR} (m/s)	$K_{ÁGUA}$ (m/s)	Referência
Solo puro de Muribeca (1)	-	-	Lira (2017), Gomes (2017) e Almeida (2017)
Solo puro de Caruaru (2)	-	-	
Solo 1 e composto (1:1)	Impermeável	$2{,}77\times10^{-9}$	
Solo 2 e composto (1:1)	$1{,}06\times10^{-7}$	$3{,}59\times10^{-8}$	
Solo puro sem fibra de coco	-	$1{,}01\times10^{-9}$	Oliveira Júnior (2018)
Solo com 0,5% de fibra de coco	-	$1{,}2\times10^{-9}$	
Solo com 1% de fibra de coco	-	$1{,}43\times10^{-9}$	

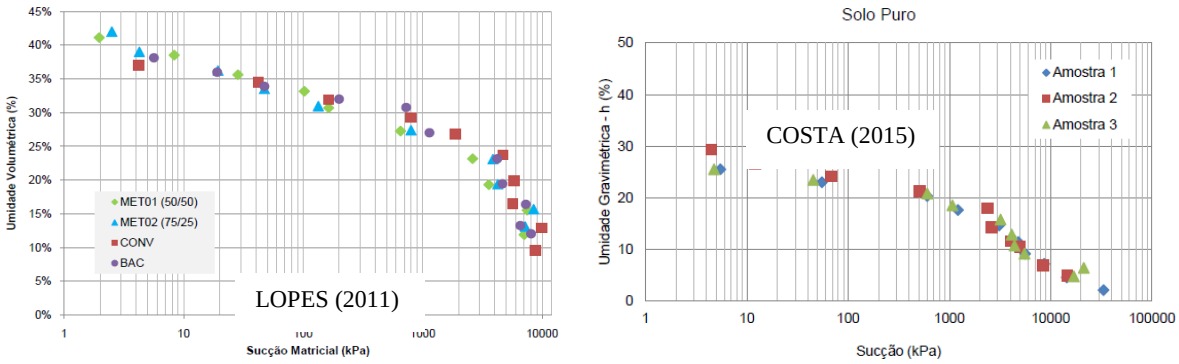
Fonte: A Autora (2019).

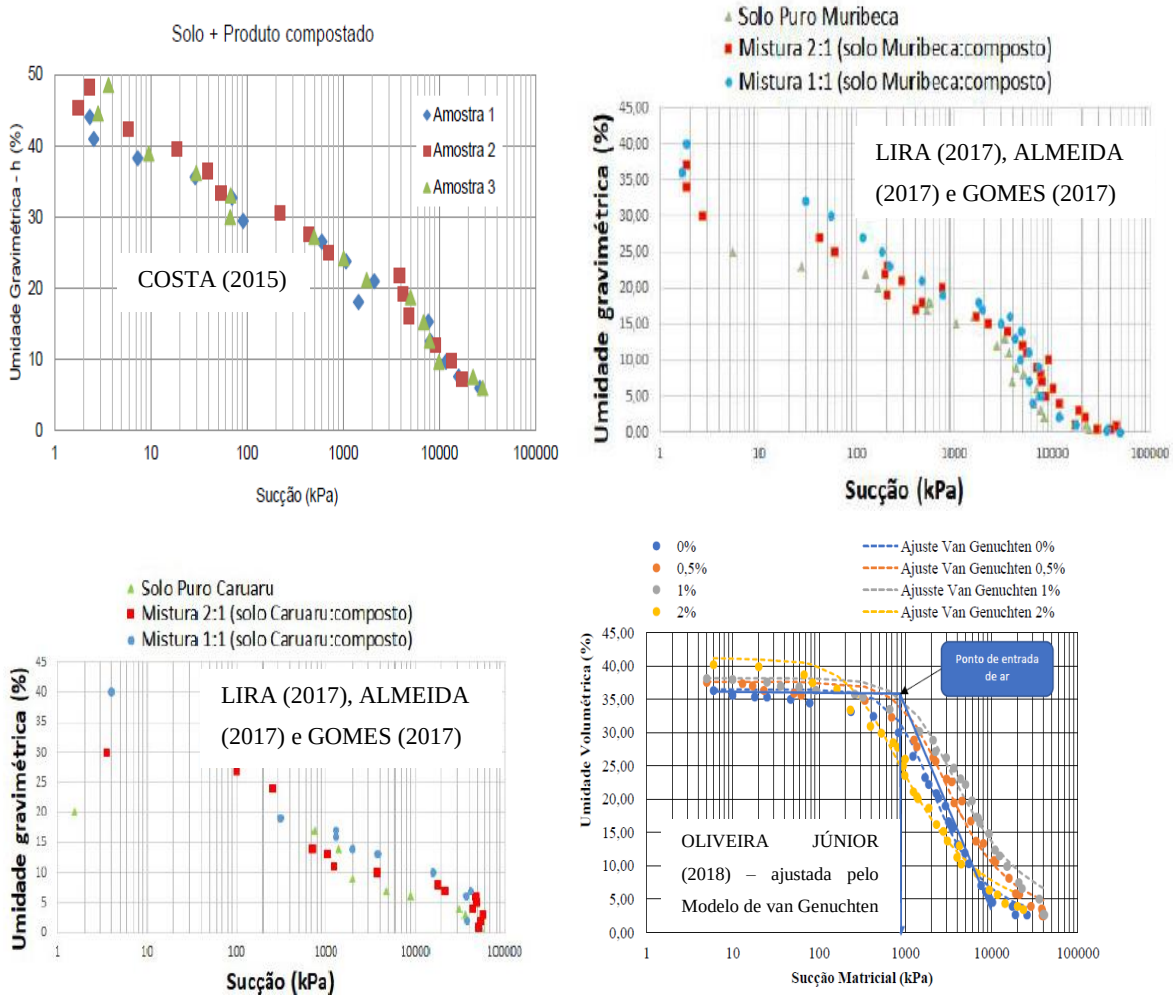
De acordo com a NBR 13.896 (ABNT, 1997), o aterro deve ser executado em local com subsolo com permeabilidade inferior a 5.10^{-5} cm/s ou 5.10^{-7} m/s. Assim, observando acima a Tabela 4, os valores encontrados – em sua maioria – estiveram dentro da condição normatizada.

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 & 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 & 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 9 – Curvas características de alguns trabalhos

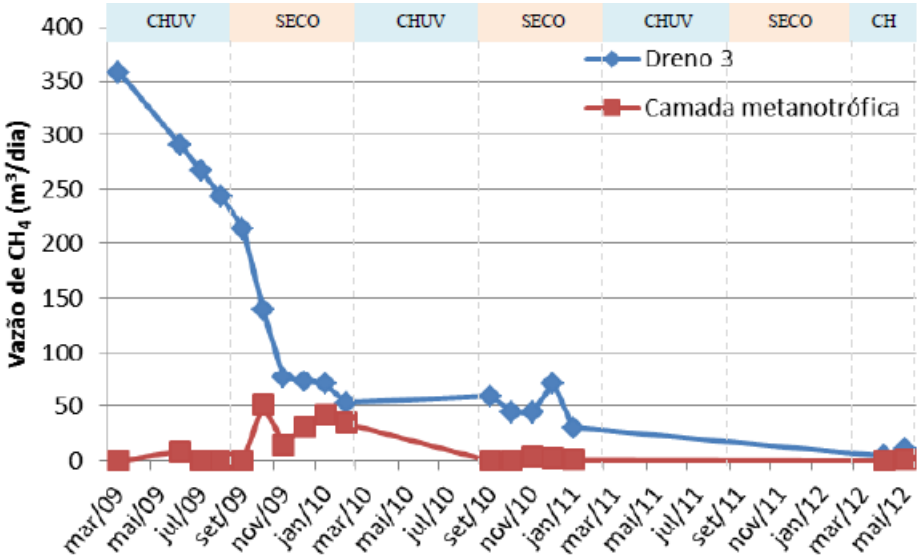




Fonte: A Autora (2019).

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 9. 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 10 – 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 10 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.

4.4 CONDIÇÕES ÓTIMAS PARA COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS

Após o levantamento dos resultados obtidos em trabalhos anteriores - do Grupo de Resíduos Sólidos (GRS), da literatura nacional e a internacional, os valores que obtiveram melhores desempenhos na estanqueidade do aterro e oxidação do metano foram os ilustrados abaixo, na Tabela 5. A escolha teve como parâmetro a aplicação do material ou mistura em aterro sanitários da Região Metropolitana do Recife (RMR).

Tabela 5 – Valores médios para desempenho dos materiais

Classificação	CL, CH	ML
IP (%)	17 a 27	11 a 17
$\gamma_{grãos}$ (g/cm³)	2,65	2,65
$\gamma_{máx}$ (g/cm³)	1,60 a 1,80	1,40 a 1,60
$\omega_{ótima}$ (%)	14,0 a 23,0	19,0 a 21,0
GC (%)	85 a 100	85 a 100
Espessura (cm)	30	30
K_{AR} (m/s)	10^{-7}	10^{-7}
$K_{ÁGUA}$ (m/s)	10^{-9}	10^{-8}

Fonte: A Autora (2019).

Legenda: IP – Índice de Plasticidade; γgrãos – Densidade real dos grãos; γmáx - Densidade aparente seca máxima; GC – Grau de Compactação; Kar – Permeabilidade ao ar; Kágua – Permeabilidade à água

É importante pontuar que a tabela abrange resultados tanto de solos puros quanto de misturas – em proporção volumétrica de 1:1 entre o solo e o composto orgânico. As faixas apresentadas representaram camadas com características tanto de reter de metano em sua massa de solo quanto de oxidar – de acordo com quantificações de campo e/ou leituras de equipamentos de laboratório.

4.5 PARÂMETROS CONDICIONANTES PARA MELHORIA DA OXIDAÇÃO DAS CAMADAS DE COBERTURA

Considerando os trabalhos realizados no Grupo de Resíduos Sólidos e comparando com os resultados de trabalhos nacionais e internacionais, existem alguns parâmetros e/ou dados que podem ser adicionados às novas pesquisas nesse campo de estudo. A inclusão destes dados enriquece e fundamenta melhor cada análise feita acerca das camadas de cobertura, entendendo melhor todo o funcionamento dos processos interdisciplinares.

O registro temporal da variação térmica nas profundidades tanto nos dados experimentais, em laboratório, como em campo é capaz de justificar e apontar para comportamentos comprovados por estudos microbiológicos. De acordo com Kjeldsen & Scheutz (2018), apesar da temperatura ótima para a oxidação do metano nas camadas de cobertura tivesse estado numa faixa de 15 a 38ºC, a temperatura ótima, das bactérias metanotróficas, encontrada foi de 45ºC. Ou seja, as biocamadas contêm microrganismos que são adaptáveis à temperatura apesar de suas características predominantemente termofílicas.

A importância do teor da água foi definida como um fator ambiental importante para camadas de cobertura. Para Kjeldsen & Scheutz (2018), o gás que transpassa a camada pode ser aquecido a depender das temperaturas e a água evaporada. A umidade no solo interfere diretamente em regiões quentes e secas com pouca infiltração de chuva, evitando a formação de rachaduras e fissuras – que aumentam as emissões de CH_4. Segundo o mesmo autor, a atividade de oxidação é afetada quando a umidade do solo diminui abaixo de 5% do peso seco.O pH (potencial hidrogeniônico) – capaz de medir a acidez – também faz parte da análise das camadas cobertura bem como a relação C/N (carbono/nitrogênio). De acordo com estudos de Huber-Humer (2009), o pH recomendado para a oxidação deve estar na faixa de 6,5 e 8,5 e, o autor ainda afirma que as bactérias metanotróficas são adaptáveis a uma ampla faixa de pH. A relação C/N, de acordo com Pedersen et al (2011), apresentou-se como o melhor indicador para a oxidação do CH_4. Além de aferir que as menores relações C/N indicaram melhores resultados, perceberam que também dá uma indicação da maturidade do composto.

O grau de saturação é capaz de mensurar a quantidade de água que está entre os grãos do solo e, por isso, considerando a reação de oxidação do metano ($CH_4 + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$) fortalece a comprovação se está ou não ocorrendo a quebra do biogás. De acordo com Gebert *et al* (2011), medições realizadas no início e final dos testes mostraram que os graus de saturação aumentaram, principalmente perto da superfície das amostras. O aumento é causado pelos efeitos combinados da oxidação, que também produz água, e da condensação da água (causada em parte pela umidificação do ar de entrada e do gás sintético). Em condições de campo, a água pode evaporar ou expirar; entretanto, no laboratório, ele continua se acumulando na amostra.

5 CONCLUSÕES

O levantamento bibliográfico teve a finalidade de agrupar os trabalhos realizados – tanto de campo como de laboratório – a fim de compará-los e associá-los aos resultados obtidos em experimentos nacionais e internacionais. Como resultados, 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 fortalecer argumentos levantados.

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.

REFERÊNCIAS

ABDIB. **Associação Brasileira da Infraestrutura e Indústrias de Base**. Empresários querem modelo norte-americano para gestão de resíduos sólidos. Disponível em: <https://www.abdib.org.br/2019/04/15/empresarios-querem-modelo-norte-americano-para-gestao-de-residuos-solidos/> Acesso em 03 nov. 2019

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019**. Disponível em: < http://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/> Acesso em 20 nov. 2019

AGEITEC - Agência Embrapa de Informação Tecnológica. **Adubação orgânica**. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Adubacao_organica_todos_os_residuosID-zK5PfRf3wp.pdf> Acesso em 20 nov. 2019

ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. 2007. 366 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

ALMEIDA, A. J. G. A. **Avaliação do desempenho das camadas de cobertura de aterro sanitário para a redução de emissões de gases de efeito estufa.** 2017. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2017.

ARAUJO, L. B. **Estudo de emissões de gases em colunas de solo simulando camadas de cobertura oxidativa de aterro sanitário.** 2014. 76 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8419**. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro – RJ. 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13896**. Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro – RJ. 1997

ASTM **D5084-10** - Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. 2010. American Society for Testing and Materials. Volume 04.08. Soil and Rock (I): D420 - D5876.

BATISTA, L. IPCC aponta mudanças no clima desde 1990. **Acervo Estadão**, São Paulo, 24 mar. 2014. Disponível em: https://acervo.estadao.com.br/noticias/acervo,ipcc-aponta-mudancas-no-clima-desde-1990,9868,0.htm. Acesso em 25 nov. 2018.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui o Código Civil. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF.

CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, 2008.

CETESB. **Potencial de Aquecimento Global de GEE.** Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-empreendimentos/potencial-de-aquecimento-global-de-gee/ Acesso em 20 nov. 2018.

COSTA, M. D. **Estudos de camadas de cobertura de aterros sanitários em colunas de solos.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2015. 145p.

COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. **Paris Agreement on climate change**. European Union: CEU, 2018. Disponível em: https://www.consilium.europa.eu/en/policies/climate-change/timeline/ Acesso em 10 jan. 2019

EC. **European Comission**. Biodegradable Waste. Disponível em: < https://ec.europa.eu/environment/waste/compost/developments.htm > Acesso em: 06 jan. 2020

EC. **European Comission**. Revision of the Landfill Directive. Disponível em: <https://ec.europa.eu/environment/waste/landfill/activities.htm> Acesso em: 03 nov. 2019

GEBERT, J.; GROENGROEFT, A; PFEIFFER E-M. (2011a) **Relevance of soil physical properties for the microbial oxidation of methane in landfill covers**. Soil Biology & Biochemistry. Article In Press. DOI: 10.1016/j.soilbio.2010.07.004. 2011.

GEBERT, J., RÖWER, I. U., SCHARFF, H., RONCATO, C. D. L., & CABRAL, A. R. (2011b). **Can soil gas profiles be used to assess microbial CH4 oxidation in landfill covers?** Waste Management, 31(5), 987–994. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.10.008

GLOBO. **Prefeitura de Bom Despacho licencia construção de aterro sanitário**. (2019). Disponível em: < https://g1.globo.com/mg/centro-oeste/noticia/2019/04/29/prefeitura-de-bom-despacho-licencia-construcao-de-aterro-sanitario.ghtml> Acesso em 28 nov. 2019

GOMES, G. J. C. **Comportamento de misturas de solo e composto orgânico para dimensionamento de camadas de cobertura de depósitos de resíduos sólidos urbanos.** 2017. 72 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

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. DOI: 10.1016/j.gexplo.2016.05.014

GRS. **Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos urbanos no Brasil, Europa, Japão e Estados Unidos**. Disponível em: http://www.grs-ufpe.com.br/publicacoes/ Acesso em 06 de junho de 2017.

HUBER-HUMER, M., RÖDER, S., & LECHNER, P. (2009). **Approaches to assess biocover performance on landfills**. Waste Management, 29(7), 2092–2104. doi: 10.1016/j.wasman.2009.02.001

IPCC. **INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE**. Draft report f the forty-ninth session of the IPCC. Kyoto, 2019. Relatório. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/06/050820191121-Doc2Rev.1REPTp-49.pdf> Acesso em 03 nov. 2019

JUCÁ, J. F. T., & MACIEL, F. J. (2006). **Gas Permeability of a Compacted Soil Used in a Landfill Cover Layer**. Unsaturated Soils 2006. DOI: 10.1061/40802(189)128

KJELDSEN, P., & SCHEUTZ, C. (2018). **Landfill Gas Management by Methane Oxidation. Solid Waste Landfilling**, 477–497. doi:10.1016/b978-0-12-407721-8.00024-3

LIRA, B. S. **Uso de composto orgânico como material componente para camada de cobertura oxidativa.** 2017. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

LOPES, R. L. **Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de Aterros de Resíduos Sólidos**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2011. 268 p.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2003. 173 p.

MAIA, J. P. S.; SOUSA, J. F. M.; CÂMARA JUNIOR, C. L. **Avaliação do comportamento físico mecânico de um solo**. Vetor - Revista de Ciências Exatas e Engenharias, Rio Grande, v. 25, n. 1, p.57-75, ago. 2015.

MALDANER, L. S. **Cobertura para oxidação biológica do metano em Aterros de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. Programa de Pós-graduação em Engenharia, São Paulo. 2011. 109p.

MARIANO, M. O. H. **Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterro de resíduos sólido.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife. 2008. 243p.

MCTIC. **Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações**. Disponível em: http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/salaImprensa/noticias/arquivos/2018/01/Em_uma_decada_Brasil_reduziu_emissoes_de_gases_de_efeito_estufa_do_Brasil_em_cerca_de_50.html?searchRef=emiss%C3%B5es%20de%20gases&tipoBusca=expressaoExata Acesso em 06 ago. 2019

NWRA. **National Waste & Recycling Association**. Polity Position – Energy Generation. Disponível em: <https://wasterecycling.org/page/EnergyGeneration> Acesso em 03 nov. 2019

OLIVEIRA, L. G. de. **Estudo das emissões de biogás em camadas de coberturas de aterro de resíduos sólidos urbanos**. 2013. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

OLIVEIRA JÚNIOR, A. I. **Comportamento geotécnico de misturas compactadas de solo argiloso com fibras curtas de coco.** 2018. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

PEDERSEN, G. B., SCHEUTZ, C., KJELDSEN, P. (2011). **Availability and properties of materials for the Fakse Landfill biocover**. Waste Management, 31(5), 884–894. doi:10.1016/j.wasman.2010.11.020

PROTEGEER. **O que é o ProteGEEr?** Disponível em: http://www.protegeer.gov.br/ Acesso em 12 dez. 2018

PURIFICAÇÃO, Rodrigo Cavalcanti. **Utilização de biocamada metanotrófica como alternativa para redução de emissões de metano por aterros sanitários.** 2009. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

ROSE, J. L. **Análise comparative entre as reduções da emissão de metano em camadas oxidativas experimentais**. 148 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2009.

SAARELA, J. **Hydraulic approximation of infiltration characteristics of surface structures on closed landfills**. 139 p. Monographs of the Boreal Environment Research, 3. Finnish Environment Institute, Finland, 1997.

SANTOS, G.M. **Comportamento hidromecânico de solo e das misturas solo-composto utilizados em camadas de cobertura no aterro experimental da Muribeca**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

SARDI, M.; CECCHERINI, M. **Política Nacional de Resíduos Sólidos: dificuldades para implantação**. Brasília, 12 fev. 2017. Disponível em: https://www.camara.leg.br/radio/programas/507503-politica-nacional-de-residuos-solidos--dificuldades-para-implantacao. Acesso em: 15 nov. 2019

SEEG. **Emissões de GEE pelo setor Resíduos**. 2017 Disponível em: http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2016/09/FINAL-16-09-13-RelatoriosSEEG-Residuos.pdf Acesso em 15 jul. 2017

SEEG. **Estimativas de emissões de Gases de Efeito Estufa do Brasil 1970-2017**. 2018 Disponível em: < http://www.observatoriodoclima.eco.br/wp-content/uploads/2018/11/PPT-SEEG-6-LANCAMENTO-GERAL-2018.11.21-FINAL-DIST-compressed.pdf > Acesso em: 21 nov. 2019

SENADO FEDERAL. **Como alguns países tratam seus resíduos**. Disponível em: http://www.senado.gov.br/noticias/jornal/emdiscussao/residuos-solidos/materia.html?materia=como-alguns-paises-tratam-seus-residuos.html Acesso em 05 nov. 2018

USEPA - US Enviromental Protection Agency. Closure and Post-Closure Care Requirements Disponível em: https://www.epa.gov/landfills/requirements-municipal-solid-waste-landfills-mswlfs#groundwater Acesso em 21 dez 2017.

VAN ELK, A. G. G. P. **Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos**: Redução de emissões na disposição final. Rio de Janeiro: IBAM, 2007. 44 p.

Waste Recycling. **Modern Landfill Gas to Energy**. Disponível em :<https://cdn.ymaws.com/wasterecycling.org/resource/resmgr/files/issue_brief/NWRA_Issue_Brief_LFGTE_Oct20.pdf>Acesso em 03 nov. 2019

ZORNBERG, J. G. LAFOUNTAIN, L. CALDWEL, J. A. Analysis and design of evapotranspirative cover for hazardous waste landfill. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2003.v. 129, n.6, p. 427 – 438.

ZORNBERG, J. G. & MCCARTNEY, J. S. **Chapter 34: Evapotranspirative Cover Systems for Waste Containment.** The Handbook of Groundwater Engineering, 2nd Edition, Jacques W. Delleur (Editor-in-Chief), 2006.

APÊNDICE A - TRABALHOS REALIZADOS PELO GRS - GRUPO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Autor	Natureza	Título	Objetivos
Maciel (2003)	Dissertação	Estudo da geração, percolação, e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca	Avaliar o comportamento geotécnico da camada de cobertura do Aterro de Muribeca no que se refere à percolação e emissão de biogás por meio de investigações experimentais
Alcântara (2007)	Tese	Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados	Estudar o comportamento de reatores em pequena escala, simulando aterros sanitários, para avaliar a influência da composição de resíduos sólidos urbanos e de condições climáticas na evolução do processo espontâneo de degradação desses resíduos.
Mariano (2008)	Tese	Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos	Estudar o comportamento da camada de cobertura final do aterro de resíduos sólidos de Aguazinha (Olinda) quanto aos parâmetros geotécnicos e emissão de biogás através de investigações experimentais de campo e laboratório.
Purificação (2009)	Dissertação	Utilização de biocamada metanotrófica como alternativa para redução de emissões de metano por aterros sanitários	Estudar o comportamento das emissões de metano nas camadas de cobertura de aterros de RSU tradicionais e em sistemas de biocamada oxidativa nas esferas de campo (célula piloto) e laboratório (caixa de oxidação).
Lopes (2011)	Tese	Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de aterros sanitários de resíduos sólidos	Avaliar o desempenho de três diferentes camadas de cobertura de aterro de resíduos sólidos, quanto à infiltração de líquidos e emissão de CH_4.
Oliveira (2013)	Dissertação	Estudo das emissões de biogás em camadas de cobertura de aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos	Avaliar as emissões de biogás ao longo do tempo (3 anos, de 2009 a 2012) em três diferentes configurações de camadas de cobertura no Aterro Experimental da Muribeca-PE

Autor	Natureza	Título	Objetivos
Costa (2015)	Tese	Estudo de camadas de cobertura de aterros sanitários em colunas de solos	Analisar em laboratório, através de ensaios de colunas de solos, o desempenho de duas camadas de cobertura configuradas a partir de célula experimental construída no Aterro da Muribeca, compreendendo o comportamento dos solos em função do fluxo de líquidos e gases.
Lira (2017)	Dissertação	Uso de composto orgânico como material componente para camada de cobertura oxidativa	Analisar em laboratório, através de ensaios de colunas de solos, o comportamento da camada de cobertura com uso de composto orgânico., buscando avaliar seu desempenho na redução de emissões de gases de efeito estufa.
Gomes (2017)	Monografia	Comportamento de misturas de solo e composto orgânico para dimensionamento de camadas de cobertura de depósitos de resíduos sólidos urbanos	Analisar, em laboratório, o desempenho de duas camadas de cobertura perante o fluxo de gás metano, uma com solo de características predominantemente siltosas e outra com solo de características predominantemente arenosas, ambas misturadas com composto orgânico coletado do Jardim Botânico da cidade do Recife e obter parâmetros para o dimensionamento.
Almeida (2017)	Dissertação	Avaliação do desempenho das camadas de cobertura de aterro sanitário para a redução de emissões de gases de efeito estufa	Analisar o desempenho de dois tipos de materiais para a utilização em camadas de cobertura oxidativas reproduzidas em laboratório, através de ensaios de coluna de solo, e avaliação da sua funcionalidade na redução de emissões de gases de efeito estufa.
Oliveira Júnior (2018)	Dissertação	Comportamento geotécnico de misturas compactadas de solo argiloso com fibras curtas de coco	Analisar a influência no comportamento geotécnico e a interface matriz-reforço de um solo argiloso compactado mediante a inclusão de diferentes teores de fibras curtas oriundas dos resíduos do coco verde (*Cocos nucifera*) distribuídas aleatoriamente na matriz de solo.