



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

SAMARA CASTRO FREIRE

**ESTUDO GEOTÉCNICO DA CAMADA DE COBERTURA FINAL DO ATERRO
SANITÁRIO METROPOLITANO OESTE DE CAUCAIA (ASMOC), CEARÁ**

FORTALEZA

2022

SAMARA CASTRO FREIRE

ESTUDO GEOTÉCNICO DA CAMADA DE COBERTURA FINAL DO ATERRO
SANITÁRIO METROPOLITANO OESTE DE CAUCAIA (ASMOC), CEARÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Geologia. Área de concentração: Geologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo.
Coorientador: Prof. Dr. Gemmelle Oliveira Santos.

FOTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F935e Freire, Samara Castro.
Estudo geotécnico da camada de cobertura final do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), Ceará / Samara Castro Freire. – 2022.
118 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo.
Coorientação: Prof. Dr. Gemelle Oliveira Santos.

1. Monitoramento geotécnico. 2. Aterros sanitários. 3. Coberturas finais. 4. Humbolt geoGaugeTM. I. Título.

CDD 551

SAMARA CASTRO FREIRE

ESTUDO GEOTÉCNICO DA CAMADA DE COBERTURA FINAL DO ATERRO
SANITÁRIO METROPOLITANO OESTE DE CAUCAIA (ASMOC), CEARÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Geologia. Área de concentração: Geologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em: 31/10/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Gemelle Oliveira Santos (Coorientador)
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

Prof^a. Dr^a. Carla Beatriz Costa de Araújo (Presidente)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Roberto Antônio Cordeiro da Silva (Membro externo)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida.

À minha mãe pelo apoio incondicional durante essa jornada e em todos os momentos da minha vida.

Sou extremamente grata ao meu orientador Prof. Dr. César Veríssimo e coorientador Prof. Dr. Gemmelle Oliveira pelos ensinamentos acadêmicos. Agradeço à Prof^a Dr^a. Carla Beatriz que não exitou em me auxiliar quando solicitada mesmo não tendo vínculo oficial na presente pesquisa, o que demonstra o seu afeto à ciência do nosso país.

Aos técnicos/colaboradores do ASMOC que me ajudaram durante as campanhas de campo e cederam as informações necessárias à elaboração de parte dessa pesquisa.

Às amizades que construir durante o mestrado. Em especial à Kátia Santos e Adriana Souza pelos inúmeros bons momentos vividos. À todos da turma de mestrado em geologia da UFC de 2019.1, galera gente fina demais!

Ao laboratório de Geotécnica e Prospecção (LAGETEC) e ao Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação. Em especial ao Roberto Cordeiro da Silva pelo auxílio nos ensaios de campo e laboratório.

Aos professores do programa de pós-graduação em geologia da UFC, nos quais transbordam um amor incondicional pela área de atuação. Em especial à Prof^a. Dr^a. Cynthia Duarte, sempre muito prestativa e desenrolada!

À UFC pela oportunidade de concluir um mestrado acadêmico.

Ao CNPq pela concessão da bolsa durante a realização dessa pesquisa.

A todos que me ajudaram (in)diretamente para finalização dessa pesquisa.

*Voando sem instrumentos, ao sabor do vento.
Se depender de mim eu vou até o fim*

RESUMO

O objetivo desse estudo foi avaliar as condições geotécnicas da camada de cobertura final do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), no qual teve suas atividades encerradas em meados de 2021. Foram realizados ensaios *in situ* e de laboratório para caracterização geotécnica e geomecânica do solo estudado. Foi aplicado também um equipamento chamado Humbolt GeoGauge™ para medição dos módulos de rigidez e elasticidade. A análise da movimentação dos marcos superficiais se deu com o objetivo de compreender o comportamento do maciço quanto às velocidades e sentidos de deslocamentos. O solo de cobertura da berma foi classificado como areia argilosa, enquanto para o talude foi areia siltosa, ambos apresentaram comportamento friável quanto à relação tensão x deformação (coesão de 7,8kPa e ângulo de atrito de 34,1°). As curvas de adensamento encontradas são típicas de solos com baixa compressibilidade. Os módulos de rigidez e elasticidade das bermas variaram, em média, entre 10,2 MN/m e 88,2 MPa; enquanto para os taludes esses valores ficaram entre 5,1 MN/m e 44,1 MPa, sugerindo que as bermas respondem melhor ao processo de compactação. Os 14 marcos superficiais analisados apresentaram deslocamentos em diferentes sentidos e direções, o que sugere que o maciço está em reconformação devido aos recalques. Em contrapartida, a velocidade dos deslocamentos ficou abaixo de 2,5 cm/dia, sendo considerado um limite aceitável para operação do ASMOC. O conjunto de ensaios aplicados ao solo da cobertura final do ASMOC foi assertiva, pois possibilitou obter parâmetros dos solos muito comuns entre os aterros brasileiros. O GeoGauge se apresentou útil ao ser utilizado como um dispositivo adicional aos ensaios já existentes para obtenção de parâmetros geotécnicos de solos.

Palavras-chave: monitoramento geotécnico; aterros sanitários; coberturas finais; Humbolt GeoGauge.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the geotechnical conditions of the final cover layer of the Western Metropolitan Sanitary Landfill of Caucaia (ASMOC), in which its activities ended in mid-2021. In situ and laboratory tests were carried out for geotechnical and geomechanical characterization of the studied soil. . An equipment called Humbolt GeoGaugeTM was also applied to measure the stiffness and elasticity modules. The analysis of the movement of the superficial landmarks was carried out with the objective of understanding the behavior of the massif regarding the speeds and directions of displacement. The cover soil was classified as silty-clay sand. presenting, therefore, a friable behavior regarding the stress x strain relationship (cohesion of 7.8kPa and friction angle of 34.1°). The density curves found are typical of soils with low compressibility. The stiffness and elasticity modules of the berms varied, on average, between 10.2 MN/m and 88.2 MPa; while for the slopes these values were between 5.1 MN/m and 44.1 MPa, suggesting that the berms respond better to the compaction process. The 14 surface landmarks analyzed showed displacements in different directions and directions, which suggests that the massif is undergoing reconfiguration due to settlements. On the other hand, the displacement speed was below 2.5 cm/day, which is considered an acceptable limit for ASMOC operation. The set of tests applied to the soil of the final cover of ASMOC was assertive, as it made it possible to obtain soil parameters that are very common among Brazilian landfills. The GeoGauge proved to be useful when used as an additional device to existing tests to obtain geotechnical parameters of soils.

Keywords: geotechnical monitoring; sanitary landfills; final coverings; Humbolt GeoGauge

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Sistemas constituintes de um aterro sanitário.....	22
Figura 2	- Comportamento do solo sob tensão.....	43
Figura 3	- Localização do ASMOC.....	46
Figura 4	- Identificação da Lateral E, na área de estudo da pesquisa.....	48
Figura 5	- Detalhes do equipamento Humbolt GeoGauge™ sobre o solo de cobertura do ASMOC	49
Figura 6	- Figura esquemática ilustrando a distribuição dos pontos analisados na Lateral E do ASMOC.....	52
Figura 7	- Imagem da lateral e de cima do Humbolt GeoGauge™ sobre a superfície ensaiada na Lateral E do ASMOC.....	53
Figura 8	- Caracterização física do solo <i>in situ</i> : a) massa específica aparente, b) umidade.....	58
Figura 9	- Caracterização física do solo em laboratório: a) granulometria por peneiramento, b) umidades natural e higroscópica, c) limites de Artterberg, d) compactação, e) densidade real dos grãos.....	59
Figura 10	- Retirada da amostra indeformada na camada de cobertura final do ASMOC	61
Figura 11	- Ensaio de adensamento: a) moldagem e retirada do corpo de prova, b) pesagem do conjunto anel e solo, c) confinamento do corpo de prova.....	61
Figura 12	- Método da balança hidrostática: a) pesagem da sub-amostra após talhada, b) parafinagem da sub-amostra.....	63
Figura 13	- Pesagem do conjunto sub-amostra e parafina imerso na água: a) balança com estrutura adaptada, b) imersão, na água, do conjunto sub-amostra e parafina	64
Figura 14	- Preparo da amostra para moldagem dos CP's utilizados nos ensaios triaxiais: a) Destorroação da amostra, b) peneiramento da amostra.....	65
Figura 15	- Moldagem do CP para os ensaios triaxiais: a) pesagem das camadas de solo, b) preenchimento da cápsula de moldagem, c) desmoldagem do CP	66
Figura 16	- Montagem da célula triaxial: a) colocação do CP sob pedra porosa; b) envolvimento do CP com as membranas látex, c) preenchimento da célula triaxial com água	67
Figura 17	- Relação Tensão x Deformação do solo de cobertura do ASMOC.....	75
Figura 18	- Envoltórias de Mohr-Coulomb das tensões efetivas aplicadas no solo de cobertura do ASMOC	76
Figura 19	- Módulo secante do solo retirado do solo de cobertura do ASMOC.....	77
Figura 20	- Módulos oedométricos obtidos para a amostra de solo da berma.....	80

Figura 21	- Módulos oedométricos obtidos para a amostra de solo do talude.....	81
Figura 22	- Histograma dos módulos de rigidez das bermas.....	85
Figura 23	- Histograma dos módulos de elasticidade das bermas.....	86
Figura 24	- Histograma dos módulos de rigidez dos taludes.....	90
Figura 25	- Histograma dos módulos de elasticidade dos taludes.....	91
Figura 26	- Localização dos MS's instalados na Lateral E, na área de pesquisa.....	93

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	- Representação da curva granulométrica do solo de cobertura da berma da área pesquisada.....	69
Gráfico 2	- Representação da curva granulométrica do solo de cobertura do talude da área pesquisada.....	70
Gráfico 3	- Representação das curvas de adensamento do solo de cobertura da berma.....	79
Gráfico 4	- Representação das curvas de adensamento do solo de cobertura do talude	79
Gráfico 5	- Boxplot dos módulos de rigidez dos taludes.....	83
Gráfico 6	- Boxplot dos módulos de elasticidade dos taludes.....	84
Gráfico 7	- Boxplot dos módulos de rigidez das bermas.....	88
Gráfico 8	- Boxplot dos módulos de elasticidade das bermas.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Critérios de avaliação da velocidade dos deslocamentos do ASMOC.....	54
Tabela 2	- Distribuição granulométrica dos solos da camada de cobertura do ASMOC	68
Tabela 3	- Massa específica dos solos de cobertura de aterros sanitários na literatura.....	71
Tabela 4	- Dados obtidos nos ensaios de Proctor normal, frasco de areia e garrafa speedy e umidade pelo método da estufa	72
Tabela 5	- Pressões hidrostáticas e axiais aplicadas no corpo de prova moldado com o solo de cobertura do ASMOC	74
Tabela 6	- Parâmetros de resistência de solos de cobertura de aterros sanitários na literatura em comparação ao obtidos na presente pesquisa.....	77
Tabela 7	- Parâmetros de adensamento da amostra do solo de cobertura do ASMOC	78
Tabela 8	- Análise estatística dos dados obtidos nas bermas pelo Humbolt GeoGauge	82
Tabela 9	- Análise estatística dos dados obtidos nos taludes pelo Humbolt GeoGauge	87
Tabela 10	- Movimentação dos MS's instalados na Lateral E da área pesquisada.....	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASMOC	Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia
ASTM	American Society For Testing and Materials
CBR	Índice de Suporte Califórnia
C_c	Índice de compressão
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CIU	Ensaio de Compressão Triaxial do Tipo Adensado e Drenado
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CP	Corpo de Prova
C_r	Índice de Re-compressão
C_v	Índice de Adensamento
C	Índice de Compressão
Var	Coefficiente de Variação
DCP	Cone de Penetração Dinâmica
DP	Desvio Padrão
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
G	Grama
g/cm^3	Grama por centímetro cúbico
GC	Grau de Compactação
ha	Hectares
Hz	Hertz
IBAM	Instituto Brasileiro de Administração Municipal
K	Valor de rigidez
Kg	Kilograma
KPa	Quilopascal
LFWD	Deflectômetro de Impacto Leve
Max	Máximos
Md	Mediana
Min	Mínimos
ml	Mililitros
mm/min	Milímetros por minuto

mN/m	Milnewton por metro
MPa	Mega Pascal
MS	Marcos Superficiais
NBR	Norma Brasileira
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PLT	Teste de Placa de Carga
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PVC	Policloreto de Vinila
R	Raio exterior do anel da base
RECESA	Rede Nacional de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
USEPA	United States Environmental Protection Agency
Var	Variância

LISTA DE SÍMBOLO

e_0	Índices de Vazios Inicial
S_1	Pressões Axiais
S_3	Pressões Hidrostáticas
ν	Coefficiente de Poisson
μ	Média
σ'_{pa}	Tensão de pré-adensamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Considerações Gerais	16
1.2	Justificativa	17
2	OBJETIVOS	19
2.1	Geral	19
2.2	Específicos	19
3	REVISÃO DE LITERATURA	20
3.1	Os Aterros Sanitários	20
3.1.1	<i>Considerações Gerais</i>	20
3.1.2	<i>O Projeto</i>	22
3.1.3	<i>A Instalação</i>	24
3.1.4	<i>A Operação</i>	25
3.1.5	<i>O Encerramento</i>	28
3.1.6	<i>O Reuso da Área</i>	28
3.2	O Monitoramento Geotécnico dos Aterros Sanitários	30
3.3	Camadas de Cobertura Final de Aterros Sanitários	34
3.3.1	<i>Camadas Metanotróficas</i>	36
3.3.2	<i>Camadas Evapotranspirativas</i>	38
3.3.3	<i>Camadas Capilares</i>	40
3.4	Módulos de Rigidez e Elasticidade obtidos pelo Humbolt GeoGauge™	42
3.4.1	<i>Módulo de Rigidez</i>	43
3.4.2	<i>Módulo de Elasticidade</i>	44
4	METODOLOGIA	46
4.1	A Área de Estudo	46
4.2	Etapas da Pesquisa	47
4.3	O Humbolt GeoGauge™	48
4.4	Ensaio com o Humbolt GeoGauge™ no Solo de Cobertura Final do ASMOC	51
4.5	O Monitoramento Geotécnico Realizado pelo Corpo Técnico do ASMOC	53
4.6	Caracterização do Solo Utilizado na Execução da Camada de Cobertura do ASMOC	55
4.6.1	<i>Caracterização Geotécnica do Solo da Camada de Cobertura do ASMOC</i>	55

4.6.2	<i>Caracterização Geomecânica do Solo da Camada de Cobertura do ASMOC</i>	60
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
5.1	Caracterização Geotécnica do Solo de Cobertura do ASMOC	68
5.2	Caracterização Geomecânica do Solo de Cobertura do ASMOC	74
5.2.1	<i>Ensaio de Compressão Triaxial</i>	74
5.2.2	<i>Ensaio de Adensamento Endométrico</i>	78
5.2.3	<i>Ensaio com o Humbolt GeoGauge</i>	81
5.3	Análise da Movimentação do Histórico de Leitura dos Marcos Superficiais Instalados no ASMOC	92
6	CONCLUSÕES	96
7	SUGESTÕES	99
	REFERÊNCIAS	100

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

Os aterros sanitários são obras de engenharia destinadas ao armazenamento seguro de Resíduos Sólidos Urbanos - RSU que não sofreram um tratamento mais nobre (reutilização, reciclagem, compostagem, aproveitamento energético e outros)¹.

No Brasil, os aterros sanitários são o único método de disposição de RSU sobre o solo reconhecido pela Lei 12.350/2010, que trata da Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS, e devem ser projetados para minimizar impactos ambientais e sociais.

No contexto urbano, a instalação de novos aterros sanitários é um grande desafio - em termos técnicos, econômicos e ambientais - o que aumenta a pressão sobre as áreas em operação (para receberem mais RSU) e justifica o crescimento e/ou alteamento de aterros encerrados.

O processo de encerramento de aterros trás inúmeras preocupações no que tange à sua estabilidade. Para Kölsch e Bauer (2009) essa estabilidade depende de vários parâmetros: nível de lixiviados, coesão e ângulo de atrito dos resíduos (RONG; ZHAOGUI; TUGEN, 2011), composição e compactação dos resíduos, condições climáticas, geometria do aterro, estabilidade do solo (KÖLSCH; BAUER, 2009). Depende também do comportamento dos recalques dos resíduos e da integridade da camada de base e de cobertura (LAW *et al.*, 2013).

A estabilidade dos aterros sanitários, sob diversas metodologias de campo e laboratório, vem sendo tema de pesquisas nacionais (STRAUSS, 1998; OLIVEIRA, 2002; CATAPRETA, 2008; BORGATTO, 2006; SCHULER, 2010; MOREIRA *et al.*, 2013; SILVA, 2015; REMÉDIO, 2014; DA SILVA, 2017) e internacionais (JIANGUO; YONGFENG; QINGZHONG, 2001; HOSSAIN; HAQUE, 2009; XU; TOLAYMANT; TOWNSEND, 2012; BABU; REDDY; SRIVASTAVA, 2014).

¹Na realidade, os aterros sanitários deveriam receber apenas rejeitos, ou seja, resíduos sólidos cujas possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis foram esgotadas.

Atualmente, o Brasil abriga 652 aterros sanitários, sendo que 61% possui alguma atividade classificada como de monitoramento ambiental (SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO - SNIS, 2020). No Estado do Ceará existem 06 aterros sanitários (SNIS, 2020), sendo que o maior deles fica na Região Metropolitana de Fortaleza: o Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), com 123 hectares (ha).

O ASMOC começou a receber os RSU de Fortaleza em 1998 e o encerramento de suas atividades de disposição ocorreu em junho de 2021, mas seus resíduos continuarão, por um longo período, sofrendo transformações física, química e biológica de forte influência sobre os recalques e estabilidade da obra, sendo de extrema importância iniciar seu monitoramento geotécnico para prever riscos de desmoronamento.

Assim, esse trabalho realizou ensaios geotécnicos e geomecânicos, além de aplicar um equipamento chamado Humboldt GeoGauge™ para estimar os módulos de rigidez e elasticidade do solo da camada de cobertura (bermas e taludes) da lateral de uma célula desativada localizada no ASMOC como um método complementar à análise da integridade geotécnica da camada de cobertura final do ASMOC.

1.2 Justificativa

Os aterros sanitários precisam de monitoramento geotécnico e ambiental durante sua vida útil e por muitos anos após seu encerramento, para evitar acidentes (desmoronamento e explosões) e danos ambientais (contaminação do ar, dos solos e recursos hídricos superficiais e subterrâneos).

Do ponto de vista geotécnico, a estabilidade do aterro sanitário depende da inclinação dos taludes, da altura do aterro, das propriedades que existem na interface solo-resíduo, do comportamento das deformações horizontais e do tipo de camada de cobertura (SARAVANAN *et al.*, 2008).

Sarihan e Stark (2008), após retroanálise do rompimento de 04 aterros sanitários (Polônia, Turquia, Israel e Filipinas), apontaram entre as possíveis causas dos acidentes: a presença elevada de água tanto nos solos quanto nos resíduos,

taludes muito íngremes, falta de cobertura vegetal e de drenagem de águas pluviais, grande processo erosivo, a presença de resíduos da construção civil na camada de cobertura, bolsões de água no topo do aterro, acúmulo elevado de chorume dentro do maciço e presença de rachaduras no topo do aterro.

As falhas nos sistemas de coberturas de aterros encerrados e seus respectivos acidentes geotécnicos vem sendo estudadas na literatura (KOERNER; HWU, 1991; ALBRIGHT, 2006; SARIHAN; STARK, 2008; ATHANASOPOULOS *et al.* 2010; EID, 2011; YIN *et al.*, 2016), mas são escassos os relatos sobre o monitoramento *in situ* da integridade da camada de cobertura de aterros que se encontram em processo de desativação, o que motivou a realização dessa pesquisa.

Uma importante iniciativa aplicada ao ASMOC foi a instalação de um sistema de aproveitamento energético do biogás gerado através da biodegradação dos resíduos aterrados. Sabe-se que aterros submetidos à extração de biogás respondem em tamanho, forma e acomodação devido à pressão negativa que retira o biogás do interior do maciço, dando espaço à reconformação do aterro.

Dito isto, a extração de gases viabilizada pela degradação da matéria orgânica agrega riscos geotécnicos ao aterro sanitário em função da formação de depressões e deslocamentos de solo da cobertura final para o interior dos resíduos (BOSCOV, 2008), ocasionando a perda de estanqueidade e o surgimento de fissuras e trincas (ALVES, 2010).

As fissuras podem resultar em caminhos preferências de fluxos de gases (JONES; DIXON, 2005) e infiltração de grandes volumes de águas pluviais para o interior da massa de resíduos, ocasionando deformações do maciço e consequente deslizamento da camada (XU; TOLAYMANT; TOWNSEND, 2012; PENG *et al.*, 2016; FENG; GAO, 2012), o que prejudica a selagem do aterro e sua consequente sustentabilidade (COSTA, 2015), justificando, assim, o presente estudo geotécnico da cobertura final do ASMOC.

Os resultados obtidos nessa pesquisa, além de inéditos, podem aprimorar a rotina operacional do novo aterro - implantado ao lado do atual, com área total de 101,70 hectares (ha), ficando 73 ha destinados ao depósito dos RSU. Além disso, a conclusão da presente pesquisa pode desencadear o monitoramento geotécnico pós-encerramento dos demais aterros do Estado do Ceará.

2 Objetivos

2.1 Geral

Avaliar as condições geotécnicas da camada de cobertura final do ASMOC.

2.2 Específicos

Como objetivos específicos podem ser citados:

- Determinar os módulos de rigidez e elasticidade do solo da camada de cobertura final do ASMOC por meio do equipamento Humbolt GeoGauge e dos ensaios de compressão triaxial e adensamento edométrico.
- Realizar a caracterização física e mecânica do solo da camada de cobertura final do ASMOC.
- Realizar a análise da movimentação dos marcos superficiais instalados no ASMOC.
- Contribuir para o controle geotécnico do ASMOC

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Os Aterros Sanitários

3.1.1 Considerações Gerais

Com a proibição legal do uso de lixões, as municipalidades devem aderir à técnica de aterros sanitários no Brasil. A Norma Brasileira (NBR) 8.419/1992 define o aterro sanitário como:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, que utiliza princípios de 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 (ABNT, 1992).

A disposição final de resíduos em aterros sanitários evita a proliferação de vetores, riscos à saúde pública e degradação ambiental (OBLADEN; OBLADEN; BARROS, 2009), possibilita a geração de benefícios econômicos pela geração de produtos como energia elétrica, calor e metano (CONDE; STACHIW; FERREIRA, 2016) e créditos de carbono com a comercialização do biogás (LIMA *et al.*, 2017; VIDAL *et al.*, 2018).

Os aterros sanitários também trazem inúmeros passivos. Conforme Conte e Carrubba (2013) os aterros possuem potencial para impactos ambientais negativos, mesmo com a adoção de medidas sanitárias e ambientais, de fluxo de contaminantes causados por eventos naturais, irregularidades na construção e no gerenciamento; ocupam grandes áreas, cada vez mais escassas nos conglomerados urbanos (CAMPOS; BRAGA, 2005); geram conflitos de ordem socioambiental e política (GUEDES; RIBEIRO, 2017).

Os aterros constituem componentes complexos dentro do gerenciamento integrado dos RSU, sendo este gerenciamento um conjunto de ações normativas, operacionais, financeiras e de planejamento que uma administração municipal

desenvolve para coletar, segregar, tratar e dispor os resíduos de sua cidade (CEMPRE, 2018). Na visão de Lima *et al.* (2017), falhas em alguma dessas etapas comprometem diretamente todo o sistema, e é sob esse cenário que o meio ambiente, a saúde pública e a vida útil dos aterros são seriamente prejudicadas.

O maquinário para aterros sanitários é constituído por máquinas para as etapas de escavação, preparação do terreno, obtenção de material de cobertura, disposição, espalhamento, compactação e recobrimento dos resíduos (OBLADEN; OBLADEN; BARROS, 2009) e além da área reservada para a disposição de resíduos, os aterros devem possuir toda uma estrutura de apoio com prédio administrativo, guarita e cerca para controle de acesso, balança rodoviária e outros, conforme as NBR 8.419/92, NBR 13.896/97, NBR 15.849/10.

Os requisitos para implantação de um aterro sanitário geralmente são mínimos nos municípios de pequeno e médio porte, contudo, ainda é possível a implantação de aterros em escalas menores (SNSA, 2009; MATOS; DIAS, 2011). Dessa maneira, uma alternativa para esses locais são os consórcios públicos constituídos nos termos da Lei nº 11.107, de 2005 e instituído como um dos instrumentos da PNRS (Lei nº 12.350/2010).

Os consórcios intermunicipais constituem uma forma de solução conjunta entre os municípios e tem como objetivo viabilizar a descentralização e a prestação de serviços públicos que envolvam resíduos sólidos, principalmente a implantação de aterros. Além disso, os municípios que fazem parte de consórcios obtêm incentivos financeiros instituídos pela união federal (BRASIL, 2010).

O rápido esgotamento da vida útil dos aterros é, definitivamente, consequência do constante aumento da produção diária de resíduos pela população. Para Pereira e Maia (2012), a gestão integrada de resíduos aliada à reeducação ambiental são fundamentais para aumentar a durabilidade desses equipamentos. Aterros sanitários encerrados devem apresentar estabilidade e aparência agradável, com impactos à saúde e ao ambiente adjacente inexistentes ou minimizados (DATTA; VEERA, 2007).

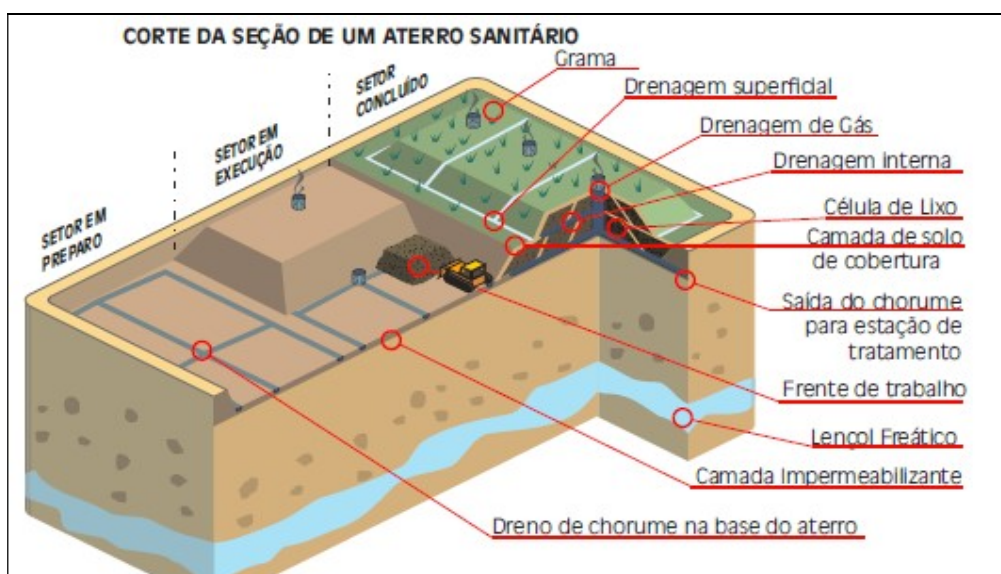
Estudos sobre o comportamento geotécnico da massa de resíduos têm sido utilizados para concepção, projeto, instalação e operação de novos aterros sanitários (VAN ELK; BOSCOV, 2016).

3.1.2 O Projeto

Diante de tantos critérios que circundam os aterros sanitários, o primeiro desafio é a elaboração do seu projeto. A NBR 13.896/1997 é referente aos Critérios para Projeto, Implantação e Operação de Aterros de Resíduos não Perigosos, sendo uma importante publicação para um eficiente desempenho desses empreendimentos e é o principal guia dos órgãos ambientais responsáveis por fiscalizar os aterros sanitários.

Um aterro sanitário é um projeto executivo complexo composto de vários sistemas: de tratamento de lixiviados, de impermeabilização, de drenagem, entre outros. A Figura 1 mostra os elementos constituintes de um aterro sanitário típico em operação.

Figura 1 - Sistemas constituintes de um aterro sanitário



Fonte: RECESA (2008)

Pela NBR 8.419/1992 devem ser fornecidas aos projetistas dos aterros sanitários informações a cerca dos resíduos tais como sua origem, qualidade e quantidade diária e mensal da geração local, além das características dos equipamentos de transporte e da massa específica dos resíduos. Ainda o projeto de um aterro sanitário deve ser constituído pelas seguintes partes:

a) memorial descritivo, contendo informações cadastrais, informações sobre os resíduos a serem dispostos no aterro sanitário, caracterização do local destinado ao aterro sanitário, concepção e justificativa do projeto, descrição e especificações dos elementos do projeto, operação do aterro sanitário, bem como o uso futuro da área;

b) memorial técnico, contendo cálculo dos elementos do projeto, vida útil do aterro sanitário, sistema de drenagem superficial, sistema de drenagem e remoção de percolato, sistema de drenagem de gás, sistema de tratamento de percolato, cálculo de estabilidade dos maciços de terra e dos resíduos sólidos dispostos;

c) cronograma de execução e estimativa de custos, contendo estimativa detalhada dos custos dos equipamentos utilizados, mão de obra empregada, materiais utilizados, instalações e serviços de apoio e cronograma físico-financeiro;

d) desenhos com a concepção geral, indicação das áreas de disposição dos resíduos sólidos, sistema de drenagem superficial e subsuperficial, sistema de drenagem de gases, sistema de tratamento do percolato, representação do aterro concluído e cortes (ABNT, 1992).

Para a Fundação Nacional de Saúde (FUNASA, 2003) projetos de aterro requerem um memorial descritivo (que caracteriza o município, o sistema de gerenciamento de resíduos, a concepção do sistema proposto), um memorial de cálculo (com estudos referentes à população, quantidade e tipologia dos resíduos gerados), uma planilha orçamentária e um cronograma físico-financeiro.

Para Cossu e Stergmann (2018) devem ser contempladas também, de maneira bem definida, metas obrigatórias ou desejáveis sobre a altura do aterro, tempo de operação e horizonte de uso.

O projeto de aterros deve contemplar, conforme Aivaliotis *et al.* (2004), escolhas específicas sobre a morfologia dos taludes (geometria da base, inclinações das laterais), o modo de operação da frente de serviço (espessura da cobertura diária, densidade dos resíduos compactados) e a geometria das células (altura, comprimento, declives). Esses parâmetros afetam a construção, os custos de operação e a vida útil dos aterros.

3.1.3 A Instalação

A instalação de um aterro sanitário sucede a escolha de uma boa área. Entende-se da literatura (FERNANDES; SILVEIRA; OLIVEIRA, 2017; GUEVARA *et al.*, 2017) que a seleção de áreas para a instalação de aterros sanitários deve atender a critérios estabelecidos em legislação e por órgãos ambientais, a fim de minimizar os impactos decorrentes dessa técnica de tratamento de RSU.

A escolha da área destinada à instalação de aterros é guiada pela NBR n° 8.419/1992, onde são encontrados os critérios que devem justificar a seleção, tais como o zoneamento ambiental e urbano, acessos, vizinhança, economia de transporte, titulação da área escolhida, economia operacional (jazida), infraestrutura urbana, bacia e subacia hidrográfica onde o equipamento se localizará.

Conforme previsto em algumas NBR's (8.419/92, 13.896/97 e 15.849/10) a instalação de aterros sanitários demanda a construção de estruturas que permitam o controle ambiental e sanitário desses equipamentos, tais como: sistemas de impermeabilização e de drenagem e tratamento de lixiviados, de emissões gasosas e de águas pluviais.

Para pequenos aterros, a etapa de instalação é regulamentada pela Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA n°404/2008. Nela é possível encontrar, no artigo 4, exigências para a concessão do licenciamento de aterros com disposição diária de até 20 toneladas de RSU.

Uma importante etapa da instalação no aterro sanitário diz respeito à impermeabilização da base, que pode ser feito através de camadas de solo devidamente compactado (solo argiloso) ou de aplicação de geomembranas sintéticas (mantas impermeabilizantes de PVC - Policloreto de Vinila ou PEAD - Polietileno de Alta Densidade), ou ainda, através de argilas expansivas (OBLADEN; OBLADEN; BARROS, 2009).

Quanto ao sistema de drenagem de lixiviados, podem ser instalados drenos secundários ligados a um dreno principal (modelo conhecido por "espinha de peixe"). Nesse sistema, duas modalidades de dreno podem ser aplicadas: dreno cego e dreno tubular. No primeiro caso, a escavação da vala no fundo da célula de resíduos é preenchida com brita, geralmente n°4, e com um material drenante (ex.: areia grossa). No segundo caso, são

implantados dentro do leito de brita um tubo perfurado de PVC, PEAD ou manilhas de concreto. Essa rede de drenagem tem como objetivo a condução dos lixiviados produzidos na célula de resíduos para a estação de tratamento - interna ou externa ao aterro (SANTOS, 2016, p. 45).

Quanto ao sistema de drenagem de gases, podem ser instaladas linhas de tubos perfurados, sobrepostos e envoltos por uma camada de brita, que atravessam verticalmente a massa de resíduos, desde a base até a superfície superior. Concomitante aos drenos verticais, projetam-se os horizontais, que otimizem a drenagem na massa de resíduo. Esses drenos podem ser interligados ao sistema de drenagem de percolados, o que depende do tipo de tratamento adotado para os gases e lixiviados produzidos pelo aterro (CEMPRE, 2018, p. 277).

O sistema de drenagem de águas pluviais tem a finalidade de interceptar e desviar o escoamento superficial das águas pluviais durante e após a vida útil do aterro, evitando sua infiltração na massa de resíduo e a erosão nos taludes, o que pode comprometer o funcionamento das camadas de cobertura final. Além disso, deve-se considerar a deformabilidade dos aterros ao longo do tempo quando da escolha de materiais flexíveis para construção desse sistema (REDE NACIONAL DE CAPACITAÇÃO E EXTENSÃO TECNOLÓGICA EM SANEAMENTO AMBIENTAL - RECESA, 2008, p. 49).

Os drenos de lixiviados e gases são particularmente importantes para a captação e dissipação das pressões internas do aterro causadas pela percolação de líquidos e gases. Portanto, o sistema global de drenagem é fundamental para o bom funcionamento - e estabilidade - de um aterro sanitário (RECESA, 2008).

Na camada de cobertura dos resíduos, podem ser aplicados até seis componentes básicos: camada superficial, camada de proteção, camada de drenagem, barreira hidráulica ou de gás, camada de coleta de gás e camada de base (MARIANO; JUCÁ, 2010).

3.1.4 A Operação

A operação de um aterro sanitário, conforme observado na literatura (NBR nº 13.896/1997; SANTOS, 2012; LAVNITCKI *et al.*, 2016) exige o cumprimento de alguns parâmetros básicos para ser eficiente: registro e descrição dos resíduos sólidos recebidos, dos processos de espalhamento, compactação e cobertura diária,

altura e inclinação das células de resíduos dentre outros aspectos².

A compactação é o principal parâmetro a ser controlado durante a operação de aterros por entender que ela aumenta a vida útil desses equipamentos, reduz a emissão descontrolada de gases e lixiviados, melhora as propriedades geomecânicas dos resíduos, possibilita o tráfego imediato de veículos sobre o maciço (CATAPRETA, 2008, p. 108).

O recobrimento diário com solo dos resíduos se revela como um parâmetro de grande peso na operação de aterros. A pesquisa de Lima *et al.* (2017) mostrou que a cobertura diária, por si só, é um aspecto que eleva significativamente a pontuação de um aterro avaliado sob o Índice de Qualidade de Aterros proposto pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB).

Conforme Pohland e Al-Yousfi (1994) as estratégias operacionais adotadas durante a vida útil de um aterro influenciam nas fases de estabilização dos resíduos aterrados. Ainda sob forte influência do modo de operação de aterros, estão os mecanismos envolvidos na formação de lixiviados (BOSCOV, 2008; CHUN, 2018) e a condução dos recalques (SHARMA, 2000).

Conforme Chen e Zhan (2010) a operação adequada de um aterro passa também pela obtenção de informações geotécnicas sobre a resistência ao cisalhamento dos RSU, uma vez que essas informações são necessárias para avaliação da estabilidade dos taludes. Geralmente essas informações predizem falhas, parcial ou total, na massa de resíduos

A operação de um aterro sanitário é um processo dinâmico, guiado para atender as especificações de projeto. Conforme Aivaliotis *et al.* (2004) sua rotina exige escolhas específicas sobre a morfologia dos taludes (geometria da base, inclinações das laterais), modo de operação da frente de serviço (espessura da cobertura diária, densidade dos resíduos compactados) e geometria das células (altura, comprimento, declives). Ainda segundo os autores, alguns desses parâmetros afetam a construção, os custos de operação e a vida útil dos aterros.

Para a RECESA (2008), o método de execução de um aterro depende do seu porte e características topográficas, tipo de solo e profundidade do lençol

²Os parâmetros operacionais adotados durante a vida útil dos aterros devem ser constantemente monitorados para que o espaço não se torne um aterro controlado ou mesmo um lixão, o que gera custos para os municípios (NEVES, 2013).

freático da área escolhida, e pode ser do tipo:

- **Trincheira:** geralmente é utilizado em áreas planas, onde são escavadas trincheiras ou valas no solo, com dimensões variadas e adequadas ao volume de lixo gerado, permitindo a operação dos equipamentos utilizados na aterragem. As dimensões da trincheira definem os métodos construtivos, a forma de operação e os equipamentos a serem utilizados. Os resíduos podem ser compactados de forma manual ou mecânica, dependendo das dimensões da trincheira. Esse método mostra-se adequado a pequenas comunidades; pois podem ser operados de forma manual.

- **Área:** emprega-se este método em locais cuja topografia é apropriada ao recebimento do lixo sobre a superfície do terreno, sem alteração de sua configuração original. Este método consiste na formação de camadas de resíduos compactados, que são sobrepostas acima do nível original do terreno. Os resíduos são descarregados, espalhados, compactados e cobertos ao final do dia, seguindo a mesma metodologia empregada nos demais métodos.

- **Rampa:** geralmente são empregados em áreas relativamente secas e planas, de meia encosta, onde se modifica a topografia através de terraplanagem, construindo-se uma rampa cujos resíduos são dispostos; formando células. O método consiste no aterro feito com o aproveitamento de um talude, natural ou construído, onde os resíduos são compactados de encontro a esse talude (RECESA. 2009. p. 59).

O Instituto Brasileiro de Administração Municipal – IBAM (2001) apresenta algumas recomendações:

- a altura da célula deve ser de quatro a seis metros para que a decomposição da massa de resíduos aterrada ocorra em melhores condições;

- a camada ideal de solo utilizada para cobertura diária é de 20 a 30 cm; enquanto para a cobertura final deverá ter a espessura mínima de 50cm;

- a execução de uma célula em sobreposição à outra ou o recobrimento final da massa de resíduos deverá acontecer após um período de aproximadamente 60 dias;

- a largura da célula deverá ser a menor possível, em geral, suficiente para descarga de três a cinco caminhões coletores (IBAM, 2001, p. 172).

Sobre a inclinação do aterro, Datta e Veera (2007) recomendam uma inclinação de 4m na horizontal para 1m na vertical para aterros que não possuem um eficiente sistema de controle e drenagem de lixiviados. Por outro lado, se o nível

de lixiviado dentro do aterro for controlado a um baixo nível (30 cm de altura) o equipamento pode ser executado em uma inclinação maior, aumentando sua capacidade de armazenamento.

Conforme Catapreta (2008), o conhecimento sobre os parâmetros operacionais adotados durante a execução de aterros, aliado às propriedades dos resíduos, permite predizer uma maior (ou menor) segurança geotécnica desses equipamentos.

3.1.5 O Encerramento

O esgotamento da capacidade de recebimento de RSU induz ao encerramento do aterro sanitário, exigindo, assim, um conjunto de procedimentos técnicos e operacionais por um longo período para controlar os aspectos ambiental, sanitário e geotécnico do equipamento.

Os cuidados pós-encerramento envolvem o monitoramento de parâmetros que possam indicar a presença da pluma de contaminação (ALEYA *et al.*, 2019), estimar os recalques de longo prazo (secundários) e a deformabilidade do maciço (SHARMA, 2000; MARQUES, 2001); além da manutenção dos sistemas de drenagem e tratamento de lixiviados, das águas pluviais e dos gases gerados.

O aterro sanitário deve possuir um plano transparente de operação e encerramento, que conduza a área para uma finalização que contemple o futuro uso do espaço, sua reintegração à paisagem, ou seja, o seu reaproveitamento para outros fins (OLIVEIRA, 2002).

3.1.6 O Reuso da Área

As áreas que abrigam aterros sanitários encerrados se tornaram um impasse urbano-ambiental devido à sua complexidade, ao tempo, aos custos envolvidos na sua requalificação e à ocupação clandestina (LEITE, 2005; MORINGA, 2007; BARROS, 2011).

O reuso dessas áreas é considerada parte de um processo de recuperação e, atualmente, se apresenta como uma técnica bastante eficaz na

melhoria da gestão desses espaços. Na visão de Magalhães (2000), o Brasil enfrenta grandes desafios quanto à temática, principalmente devido à falta de uma legislação específica e de uma estrutura provedora de fundos para sua execução.

O tipo de reuso da área ocupada por um aterro sanitário é determinado pelas necessidades locais e condicionado à política ambiental nacional e local bem como pelo seu plano de pós-encerramento (MAGALHÕES, 2000). Assim, o reuso dessas áreas necessita de estudos sobre a aptidão local, levando em consideração a viabilidade técnica, ambiental e econômica.

Para Volpe-Filik *et al.*, 2007 um eficiente projeto de reuso dessas áreas deve possuir, obrigatoriamente, um inventário. Tal documento deve conter aspectos referentes aos resíduos recebidos durante a operação (volume total, fontes e tipos de resíduos), parâmetros operacionais (espessura das coberturas diária e final, grau de compactação, tempo de operação), características regionais e ambientais da área (clima, cobertura vegetal original e atual, relevo e geologia) e indicadores sócioeconômicos e sócioambientais da região.

Os planos de reuso dessas áreas podem incluir também a implantação de obras de baixa carga tais como parques, campos de golfe, espaços verdes para trilhas e caminhadas (VOLPE-FILIK *et al.*, 2007; MORINGA, 2007).

Projetos de reuso que indicam o processo de revegetação de aterros com gramíneas são mais eficientes quando comparado com aqueles que se utilizam de espécies arbóreas e arbustivas, por exemplo (BARROS, 2011).

Há uma concordância na literatura que os projetos de revegetação com gramíneas traz inúmeros benefícios: diminuição das fugas de gases pela cobertura (SANTOS, 2012), efeitos microclimáticos locais benéficos (VOLPE-FILIK *et al.*, 2007), recuperação paisagística (BERTELLI; FALEIROS; SILVA, 2013), auxílio no retorno da fauna e flora (OLIVEIRA, 2002), estabilização dos taludes, redução da erosão dentre outros.

Contudo, revegetar uma área degradada pela disposição de resíduos não é uma tarefa fácil, pois existem altas concentrações de alguns poluentes químicos nos solos dos aterros que comprometem a sobrevivência e desenvolvimento das espécies (MATOS; SANTOS, 2017).

Além disso, outros fatores interferem significativamente no crescimento

das plantas, tais como a redução da quantidade de oxigênio (BARROS, 2011) e a produção de gases tóxicos (XIAOLI *et al.*, 2010).

Importante destacar uma significativa restrição para o reuso dessas áreas que é a construção de edificações, em função principalmente da instabilidade do maciço e formação de gases que produz riscos de explosões (STUERMER; BROCANELI; VIEIRA, 2011).

Independentemente do tipo de reuso, é incontestável a necessidade de um parecer geotécnico (SCHULER, 2010), especialmente porque os aterros sanitários são construídos em (e com) diferentes tipos de solo (CONTE; CARRUBBA, 2013).

3.2 O Monitoramento Geotécnico dos Aterros Sanitários

Em linhas gerais, os objetivos de se monitorar um aterro sanitário são dois: acompanhar o comportamento geomecânico e o seu desempenho ambiental.

Conforme Simões e Catapreta (2013), o monitoramento permite identificar, em tempo hábil, alterações no padrão de comportamento previsto e a proposição de medidas preventivas e corretivas, orientando ações de conservação e manutenção.

A heterogeneidade dos resíduos é responsável pela grande parte do comportamento geotécnico dos aterros (NASCIMENTO, 2007; ALCÂNTARA; JUCÁ, 2010), ou seja, após aterrados, os RSU adquirem propriedades mecânicas (deformabilidade, compressibilidade, resistência ao cisalhamento) que são influenciadas pela composição, proporção, estado de alteração do resíduo e comportamento mecânico individual de cada componente (NASCIMENTO, 2007; CARNEIRO, 2013; YIN *et al.*, 2016).

Nesse sentido os plásticos, madeiras e tecidos são componentes fibrosos que contribuem para a estabilidade dos maciços, pois transferem aos resíduos um efeito-fibra, contribuindo assim para um intercepto de coesão (SCHULER, 2010). Enquanto altos teores de matéria orgânica transferem ao maciço a possibilidade de evolução rápida dos recalques.

Conforme Yin *et al.*, (2016) a estabilidade dos aterros sanitários pode ser

explorada sob duas perspectivas: a partir das características estruturais do maciço (produção de lixiviados e gases, inclinação dos taludes) e a partir das propriedades físicas e mecânicas dos RSU e solos (composição gravimétrica, ângulo de atrito e coesão, forças de cisalhamento, recalques).

O monitoramento geotécnico de aterros sanitários envolve ainda a verificação de alguns aspectos: deslocamentos verticais e horizontais; observação de trincas e deformações; análise do nível de lixiviados e de poro-pressões no interior do aterro (SIMÕES; CATAPRETA; SIMÕES, 2013).

A estabilidade global de um aterro é conduzida pelo comportamento dos deslocamentos horizontais, sendo que estes podem ocorrer em todo o maciço e na camada de cobertura final (LEITE, 2005). No interior do maciço, os referidos deslocamentos são regidos pelas forças de cisalhamento, com os respectivos valores de coesão e ângulo de atrito (SCHULER, 2010).

Em aterros sanitários é inevitável o deslocamento vertical (recalque) induzido principalmente pelo efeito da sobreposição de camadas com distintos mecanismos de compressão (TAPAHUASCO, 2009; CARIBÉ, 2015; da SILVA, 2017). Do ponto de vista mecânico os resíduos torcem, esmagam e quebram - reorientando partículas e comprimindo vazios. Isso contribui para o processo de biodegradação dos materiais; que transforma massa sólida em líquidos e gases (DENARDIN, 2013; BENTE *et al.*, 2017).

A presença de lixiviados também afeta a estabilidade do aterro sanitário, pois aumenta ou reduz a degradação dos resíduos e a geração dos gases (BYUN *et al.*, 2019). Gases e líquidos, conforme Suzuki (2012) aumentam os valores da pressão neutra dos resíduos aterrados e, conseqüentemente, induzem a diminuição do fator de segurança do aterro.

A NBR nº 11.682/1991 traz o fator de segurança como um importante aspecto a ser considerado na análise de obras com necessidade de estabilização. Isso pode ser aplicado a aterros sanitários, por exemplo, porque o fator de segurança de um maciço pode ser significativamente afetado por projetos de expansão vertical (JAFARI; STARK; MERRY, 2003).

Na visão de Caribé (2015) e Tapahuasco (2009) se os parâmetros geotécnicos forem monitorados, compreendidos, interpretados e correlacionados

tem-se uma eficiente ferramenta de gerenciamento de aterros. Além disso, o acompanhamento e entendimento das propriedades mecânicas dos RSU permitem a avaliação da integridade dos sistemas de revestimento, cobertura e drenagem de líquidos (CARNEIRO, 2013; SIMÕES; CATAPRETA, 2013) com grande aplicabilidade em projetos de expansão vertical de aterros, por exemplo (BABU; SANTHOSH; LAKSHMIKANTHAN, 2015).

Algumas pesquisas têm buscado compreender as variáveis envolvidas no processo de compressibilidade dos RSU (MORETTO, 2018) bem como determinar as interações entre a cobertura final e o corpo de resíduos (GOMES; LOPES, 2013).

Várias pesquisas (SIMÕES; LANES, 2009; DENARDIN, 2013; DA SILVA, 2010; ARAÚJO NETO, 2016) utilizaram modelos matemáticos para previsão de recalques de diversas maneiras: com leis tiradas da mecânica dos solos, leis reológicas, leis empíricas e modelos biológicos, com projeção logarítmica, exponencial, hiperbólica, com resolução analítica, geométrica ou numérica.

Existem também aterros que vêm sendo monitorados por meio de levantamentos topográficos de marcos superficiais que medem os deslocamentos dos resíduos comparativamente a um marco de referência estático (BOSCOV, 2008).

Os aterros sanitários que possuem drenos de captação de gás estão sujeitos a maiores recalques em função dos processos de reconformação geométrica e alteração das condições internas de poro-pressão (KAIMOTO; LEITE; COELHO, 2006). Diante desse cenário, a instalação de novos marcos próximos aos drenos é uma manobra que pode evitar o comprometimento de estruturas de coleta do gás (LOPES *et al.*, 2010).

Existem ainda aterros monitorados com inclinômetros que são instrumentos que propiciam efetuar a medição de variações angulares (PENZ, 2013). Em outras palavras, eles medem a movimentação dos aterros sanitários (ALCÂNTARA, 2007). Tais equipamentos fornecem dados precisos e em tempo real do maciço de resíduos e suas informações podem ser especificamente sobre os deslocamentos horizontais (EISENBERGER, 2003) ou verticais (OLIVIER; GOURC, 2007).

Segundo Virtanen (2011) a instalação de inclinômetros em aterros

sanitários requer sua fixação a uma profundidade que a parte inferior do tubo não se mova. Geralmente o tubo é feito de material flexível, para que ele possa acompanhar os movimentos da massa ao seu redor. O tubo possui transdutores que medem deslocamentos em intervalos de cerca de um metro. Isso possibilita determinar e medir, em profundidade, a linha de deflexão do dispositivo e comparar as medidas em diferentes momentos, obtendo, portanto, um perfil de transição ao longo de todo o comprimento do tubo.

Diferentemente dos marcos superficiais, os inclinômetros não detectam movimentos no centro do aterro, uma vez que a inclinação é significativamente maior nas laterais (OLIVIER, GOURC, 2007). Além disso, eles são dispositivos preferenciais no monitoramento geotécnico de superfície.

Os inclinômetros são de baixo custo operacional e de menor erro associado (VIRTANEN, 2011) e disponibiliza perfis de monitoramento contínuo (OLIVIER; GOURC, 2007).

Ainda para medir recalques em aterros, existem as chamadas “placas de recalques”, com grande aplicabilidade no monitoramento de aterros simulados (lisímetros, células experimentais) devido à possibilidade de controle das variáveis operacionais (compactação, composição dos resíduos, espessura das camadas), comumente ausente dentro da atribulada rotina de um aterro sanitário.

Tais placas têm tamanhos variados e uma haste central perpendicular ao plano horizontal. A haste deve ser revestida com um tubo de plástico flexível de modo que fique livre para permitir o deslocamento vertical da placa que é medido pelo nivelamento da extremidade superior da haste. As finalidades dessas placas é verificar os deslocamentos verticais que são provocados por cargas externas (sobreposição de camadas de resíduos e de solo de coberturas diária e final, tráfego de veículos compactadores) e pelos processos de biodegradação (ALCÂNTARA, 2007).

O monitoramento geotécnico em aterros pode ser aplicado nos seus diversos componentes, a exemplo das camadas de cobertura final - uma vez que estas possuem importantes funções no contexto de aterramento dos resíduos. Portanto, a presente pesquisa inova ao utilizar o equipamento Humbolt GeogaugeTM para monitoramento geotécnico da cobertura final do ASMOC.

A seguir, será discorrido sobre as camadas de cobertura bem como os modelos mais citados na literatura. Dessa maneira, foi priorizado os modelos mais utilizados no Brasil e seus principais aspectos.

3.3 Camadas de Cobertura Final de Aterros Sanitários

O confinamento total dos resíduos em aterros sanitários ocorre com a execução completa do sistema de camadas de cobertura final. Para Costa *et al.* (2018) o desempenho de um aterro está diretamente vinculado a um sistema de camadas eficiente e duradouro. Essas camadas são consideradas barreiras impermeáveis e segundo a NBR 8.419/2002 elas devem:

- minimizar a infiltração de água no aterro, exigir pouca manutenção, promover a drenagem, não está sujeito a erosão e possuir um coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da área do aterro.

Visando uma maior economia os projetos de camadas de cobertura necessitam ser econômicos, devendo ser indicados o tipo de impermeabilização adotado e os materiais a serem empregados, com suas especificações e características segundo as correspondentes normas sobre o assunto.

No entanto, segundo Yang *et al.* (2016) a diversidade de variáveis envolvidas, a exemplo da espessura da camada, condições climáticas, vegetação para proteção superficial, características topográficas e de projeto de aterro permanecem um grande entrave para projetos minimamente eficientes e seguros.

Existem dois tipos de coberturas finais: a camada convencional, construída predominantemente por solos argilosos compactados e com baixa condutividade hidráulica e a camada alternativa, executada com diferentes solos e variados materiais como subprodutos de compostagem, resíduos de construção e demolição, solo-cimento, geocompostos bentônicos, geossintéticos (LOCASTRO; De ANGELIS, 2016; COSTA *et al.*, 2018). Para Catapreta (2008) o tipo de cobertura final a ser aplicada depende decisivamente das características climatológicas da região onde o aterro será instalado.

Independentemente do tipo e características da camada de cobertura,

quando adequadamente executada elas têm a função de minimizar as emissões de gases e odores para a atmosfera (ATSDR, 2001; ALMEIDA, 2017), reduzir a infiltração da água e, por conseguinte a geração de lixiviados no interior do aterro (NAVES, 2019; COSTA *et al.*, 2018), proteger os resíduos da exposição ao ar (LODI; ZORNBERG; BUENO, 2009) e diminuir os possíveis riscos de incêndios (TEIXEIRA, 2009).

As camadas de cobertura transferem maior estabilidade ao maciço, uma vez que possibilita que uma possível ruptura ocorra apenas na massa de resíduos (NOBERTO; MARIANO; MEDEIROS, 2018). Além disso, evita a proliferação de vetores de doenças e facilita a recomposição da paisagem (CATAPRETA; SIMÕES; BATISTA, 2011).

No Brasil não há normas específicas que regulamentem a execução de coberturas finais de aterros, a exemplo do tipo de solo (argiloso, siltoso, arenoso) a ser utilizado. No entanto têm-se as NBR's 13.896/1997 e 15.849/2010 que são específicas para aterros, porém elas deixam em aberto as orientações práticas para operação e cuidados com a cobertura final. Ambas preconizam apenas o coeficiente mínimo de permeabilidade à água não superior a 10^{-8} m/s a ser observado para seleção do solo de cobertura.

Enquanto a Agência de Proteção Ambiental Americana United States Environmental Protection Agency (USEPA, 2003) recomenda, para fins de controle da infiltração, a aplicação de uma camada de argila com baixa condutividade hidráulica saturada (valor inferior a 10^{-5} cm/s).

No que diz respeito à determinação de outras orientações práticas, normalmente são utilizados os manuais e guias fornecidos pela USEPA (2003), bem como legislações e diretrizes europeias para complementar alguns procedimentos práticos relacionados às camadas de cobertura (ARAÚJO, 2017).

As camadas de cobertura sofrem danos em sua estrutura devido principalmente aos processos de degradação dos resíduos, ciclos de umedecimento e secagem e propagação de raízes, favorecendo, dessa maneira, a formação de trincas que facilitam a infiltração de chuva e escape de gases (ALBRIGHT *et al.*, 2006; CATAPRETA; SIMÕES; BATISTA, 2011; ANLAUF; REICHEL, 2014;).

As camadas finais possuem grande importância dentro do contexto de um

aterro, sendo necessário um plano de manutenção e acompanhamento. Para Catapreta, Simões e Batista (2011) nesse plano devem está inclusos:

- medições diárias da vazão de lixiviados em diversos pontos e das precipitações pluviométricas;
- inspeções diárias no sistema de cobertura, visando detectar poças de lixiviados, ocorrência de trincas, erosões e outros;
- avaliações diárias e/ou quinzenais da integridade e eficiência do sistema de drenagem superficial e de biogás;
- análises anuais de estabilidade de taludes.

Além disso, Bagchi e Bhattacharya (2015) recomendam a reconstrução parcial da camada de cobertura final, ou até mesmo a substituição por uma nova dentro do período de 40 anos.

As camadas de cobertura final merecem destaque. Dessa maneira, a seguir serão apresentadas algumas coberturas finais alternativas às convencionais, a exemplo das camadas metanotróficas, evapotranspirativas e capilares.

3.3.1 Camadas Metanotróficas

As camadas metanotróficas é uma alternativa eficaz para redução das emissões fugitivas do metano para a atmosfera por aterros sanitários (TEIXEIRA, 2009; GEBERT; GROENGROEFT; PFEIFFER, 2011; ARAÚJO, 2016; THOM *et al.*, 2015; MAJDINASAB, YUAN, 2017; FRANQUETO *et al.*, 2020). Esses sistemas utilizam os mecanismos de oxidação biológica por bactérias metanotróficas, onde a porção do metano que passa pela camada de cobertura é aerobicamente oxidado a dióxido de carbono, água, biomassa celular e calor (TEIXEIRA, 2009)

Esses sistemas são indicados principalmente para aterros encerrados com resíduos antigos e de pequeno e médio porte onde a recuperação do biogás não é técnica e economicamente viável (STROPARO *et al.*, 2019; LOPES *et al.*, 2010). Além disso, as biocamadas são de baixo custo e não necessitam de manutenção pós-encerramento do aterro (ARAÚJO, 2016).

Comparativamente às camadas convencionais, as metanotróficas detêm as menores taxas de emissão de metano, podendo atingir a ordem de seis a dez vezes inferiores (MARIANO; JUCÁ, 2010). Tais emissões podem ainda ser

praticamente nulas se a cobertura for bem projetada, construída e monitorada – etapas que induzem altas taxas de oxidação do metano (LOPES *et al.*, 2010).

Segundo Teixeira (2009) o potencial de oxidação do metano é afetado por fatores bióticos, com destaque para a disponibilidade de bactérias metanotróficas e de agentes inibidores, e abióticos, que incluem os aspectos:

- Climáticos: umidade, temperatura e pressão;
- Físico-químicos: pH, agentes inibidores e concentração dos substratos e nutrientes;
- Geotécnicos: porosidade, granulometria, grau de saturação e capacidade de retenção de água;
- Antrópicos: captação de biogás nos sistemas de drenagem, espessura da camada.

Todos os fatores acima referidos possuem forte interação entre si e cada um tem uma funcionalidade específica dentro do processo oxidativo. Dessa maneira, os fatores físico-químicos fornecem um habitat favorável às atividades das bactérias metanotróficas, os geotécnicos favorecem o fluxo de biogás e a difusão do oxigênio, enquanto os antrópicos condicionam o reaproveitamento energético do metano, por exemplo (TEIXEIRA, 2009; MALDANER, 2011).

Para Gebert, Groengroeft e Pfeiffer (2011) a compactação do solo aplicada nas biocamadas também é um fator determinante nos processos de oxidação. Isso se dar principalmente pelos efeitos da compactação na distribuição do tamanho dos poros e textura do solo. Esses aspectos afetam tanto a eficácia da retenção de água na camada como a taxa de metano e de oxigênio disponíveis para os microrganismos que oxidam o metano. Ainda segundo os autores um grau de compactação na ordem de 75% na umidade ótima possibilitou a eficiência oxidativa total quando o solo da camada foi submetido a um fluxo de 3,5 g CH₄/m²/h, por exemplo.

Inúmeros trabalhos buscam maximizar a eficiência das biocamadas com aplicação de diferentes compostos biológicos e orgânicos à camada de cobertura (YARGICOGLU; REDDY, 2017; ALMEIDA, 2017; BOHN *et al.*, 2011; FENG *et al.*, 2017; LISOVITSKAYA *et al.*, 2015; STROPARO *et al.*, 2019), evidenciando sua importância e utilidade prática no Brasil e no mundo.

A principal desvantagem desses sistemas está relacionada ao seu uso

prolongado, que causa a predominância da produção de CH₄ em relação à sua oxidação. Tal condição resulta na formação de uma barreira de biofilme que entope os poros do solo das camadas restringindo, dessa maneira, a percolação do metano pela camada e a entrada de O₂ pela superfície – condição mínima para a oxidação do metano (HILGER; CRANFORD; BARLAZ, 2020; MAJDINASAB, YUAN, 2017).

3.3.2 Camadas Evapotranspirativas

As camadas do tipo evapotranspirativas é uma boa opção para cobertura final em aterros, sendo muito avaliada quanto ao seu desempenho (SCANLON, 2005; BARNSWELL; DWYER, 2011). Esses sistemas usam uma ou mais camadas de solos dispostas sobre os resíduos que irá atuar como um substrato para a vegetação. Sua função é reter água até que esta seja transpirada através da vegetação ou evapotranspirada pela superfície do solo (BARROSO, 2008; CATAPRETA, 2008; LOPES, 2011).

Esses sistemas não atuam como uma barreira propriamente dita, uma vez que elas desempenham mais a função de um reservatório. Segundo Zhang e Sun (2014) essas camadas usam mecanismos de equilíbrio hídrico a fim de minimizar a percolação da água para o interior do aterro pelo solo da camada. O balanço hídrico determina o movimento de entrada, armazenamento e saída da água na cobertura (LOPES, 2011).

Essa alternativa de cobertura é também considerada técnica e economicamente viável em áreas de climas áridos e semi-áridos. Contudo, alguns aspectos podem limitar o uso das coberturas evapotranspirativas: as condições específicas do local; a localização e características do aterro; as condições climáticas da região, tais como a quantidade, distribuição e forma de precipitação (CATAPRETA, 2008; LOPES, 2011).

Os solos aplicados nas coberturas evapotranspirativas necessitam possuir baixa condutividade hidráulica e alta capacidade de armazenamento e de evapotranspiração. São essas propriedades que permitem que a camada executada manipule o balanço hídrico, aumentando o armazenamento, a evaporação e limitando a infiltração de água. A água da chuva que não escoar superficialmente é

rapidamente armazenada no topo da camada, onde a possibilidade de evaporação é maior (CATAPRETA, 2008; COSTA, 2015) e é onde ocorrem as maiores flutuações de umidade (BARROSO, 2008).

Além disso, o controle da percolação é outro aspecto que conduz o desempenho desses sistemas. Ele depende, prioritariamente, da capacidade do solo em armazenar umidade e desenvolver seus processos evapotranspirativos durante os períodos chuvosos e secos, respectivamente (ZORNBERG; LAFOUNTAIN; CALDWELL, 2003; BARNSWELL; DWYER, 2011).

A eficiência desse tipo de sistema depende também das propriedades físicas e químicas do solo, tais como a distribuição do tamanho das partículas, textura e condutividade hidráulica (McGUIRE; GUMTOW; DOYLE, 2006), pois são essas propriedades que possibilitam o armazenamento da água até que ela transpire através da vegetação ou evapore pela superfície da camada (USEPA, 2003; ZHANG; SUN, 2014).

A textura do solo determina a área de contato entre as partículas e a água (LINS, 2003). Considerado isto, os solos de textura fina (areias finas, siltes e siltes argilosos) são os mais indicados para execução desse tipo de camada (USEPA, 2003) devido principalmente à capacidade de minimizar a ocorrência de rachaduras e trincas provenientes dos processos de ressecamento do solo (ZORNBERG; LAFOUNTAIN; CALDWELL, 2003).

A NBR 13.969/1997 regulamenta o ensaio de determinação do coeficiente de percolação do solo. Essa informação é indispensável para mensurar a quantidade de líquidos que passam através da camada, permitindo avaliar se o solo escolhido para executar a camada do aterro está adequada (BELFORT *et al.*, 2019).

Independentemente das características do solo, os processos evapotranspirativos ocorrem. Para Mateus e Barbosa (2007) o potencial total da água na atmosfera, em geral, é muito menor do que no solo, gerando um gradiente que provoca o fluxo no sentido solo-atmosfera.

Alguns aspectos devem ser considerados no dimensionamento de camadas evapotranspirativas: capacidade de armazenamento de água do solo local disponível; a quantidade de água a ser acumulada na cobertura nos períodos em que as taxas de precipitação excedam as de evapotranspiração; a espessura da

camada de solo, devendo ser tal que não haja mudanças na umidade próxima à massa de resíduos; além das taxas de evapotranspiração (BARROSO, 2008; LOPES *et al.*, 2010).

Além disso, para Barroso (2008) nos projetos desses sistemas é necessário também avaliar as condições de umidade e de sucção do solo, que em geral estará na condição não saturada. Para a sucção do solo depende da umidade, estrutura, superfície específica, grau de compactação e estado de tensões a que o solo foi submetido.

Contudo, a aplicação desses sistemas é limitada para aterros que possuem projetos de aproveitamento energético do biogás, principalmente quando o projeto de construção da cobertura prever a aplicação de camadas impermeáveis para restringir o movimento ascendente do gás. Além disso, gases de aterros podem limitar a eficiência de uma cobertura evapotranspirativa por serem tóxicos para vegetação (USEPA, 2003).

3.2.3 Barreiras Capilares

As barreiras capilares são constituídas sob os mecanismos de diferenças hidráulicas de dois tipos de solos. Essa configuração permite ampliar a capacidade da cobertura final em armazenar água. Geralmente, utiliza-se uma camada de solo fino (argila ou silte-argiloso) que se sobrepõe a uma camada de solo granular (areia ou cascalho).

O princípio de funcionamento das barreiras capilares depende de inúmeros fatores inter-relacionados que, desencadeados, influenciam na sua eficiência e desempenho. Para Williams *et al.* (2011) em condições secas, o solo de granulação fina possui altas sucções e uma condutividade hidráulica significativamente menor que a do solo granular, por exemplo.

Em linhas gerais, somente quando a coluna de água for suficientemente grande - ao ponto da pressão de água superar a força capilar - é que ocorrerá a passagem da água da barreira capilar de solo fino para a de solo grosso (WILLIAMS *et al.*, 2011; LIMA, ZORBERG; PALMEIRA, 2015).

Para permitir um fluxo livre de água entre as camadas capilares, uma

inclinação mínima entre 10 e 20° é necessária quando da execução da cobertura final (IZZO, MAHLER, ROSE, 2013). Essa inclinação cria uma drenagem lateral, permitindo que o fluxo da água seja desviado ao longo do contato entre a interface até encontrar uma condição favorável para penetrar na camada do solo grosso, ou seja, é um mecanismo que retarda a infiltração de água para o interior do sistema (AMORIM, 2008; SILVA, 2011). Posteriormente, a água infiltrada será retirada pela evapotranspiração e/ou drenagem lateral (AMORIM, 2008).

Para Silva (2011) o tempo de duração entre o acumulado da água sobre a interface e o início da drenagem da água na camada inferior é condicionado pela taxa de precipitação local, pela condutividade hidráulica do meio e pelo conteúdo de água presente na condição inicial, no entanto, o referido tempo é prática e tecnicamente incalculável.

Diante desse cenário, alguns autores (HENRY, 2007; VACHON; ABDOLAHZADEH; CABRAL, 2015; CHARLES *et al.*, 2015; YAN; CHIU; YUEN, 2017) utilizaram mecanismos de modelagem numérica na tentativa de compreender o comportamento físico das barreiras capilares, visando uma eficiente aplicabilidade.

Na pesquisa de Almeida, Izzo e Mahler (2011) a configuração técnica das barreiras capilares permite atingir um acúmulo na camada de solo fino entre 80 a 90% do volume total de água. No estudo de Silva (2011) a capacidade do arranjo em restringir a passagem da água para a camada inferior é de aproximadamente 20% do volume armazenado.

Para Guizelini (2011) o desempenho desses sistemas deve ser avaliado tanto em termos de infiltração quanto de resistência ao cisalhamento, pois sua estabilidade sobre o maciço sanitário deve ser garantida. Ainda para o autor, a resistência dessas coberturas varia ao longo do tempo, na medida em que ocorre a variação da umidade do solo.

Esses sistemas são vulneráveis a chuvas intensas e prolongadas e/ou quando o sistema de barreira não estiver apropriadamente dimensionado. Nesse cenário, a umidade dos solos pode aumentar e conseqüentemente reduzir a sucção na interface das camadas para sucções inferiores alterando; dessa maneira, a condutividade hidráulica do solo grosseiro (AMORIM, 2008).

Além disso, contaminantes tensoativos também modificam os índices de

umidade-pressão e condutividade hidráulica das barreiras capilares, uma vez que possuem uma tensão superficial inferior a da água pura (HENRY, 2007).

As coberturas capilares também sofrem os efeitos dos ciclos de umedecimento e secagem, a exemplo do aparecimento de trincas e rachaduras. Na tentativa de minimizar esses efeitos alguns autores (GUIZELINI, 2011; LIMA, 2014) realizaram pesquisas em que foram aplicados materiais hidrofóbicos. A aplicação desses materiais permite principalmente minimizar os custos com a construção da barreira capilar, que pode então ser formada por camadas de mesma granulometria e mesma origem, por exemplo.

Alguns autores estudaram também a viabilidade da utilização de RSU pré-tratado biologicamente (BIZARRETA; de CAMPOS, 2011; ALMEIDA; IZZO. MAHLER, 2011) e diferentes geossintéticos (TROVATTO; PORTELINHA, 2015; ZORNBERG; BOUAZZA; McCARTNEY, 2010; OTHMAN; FROST; DIXON, 2014; ALBINO *et al.*, 2016) como material aplicado em barreiras capilares em substituição ou até mesmo um uso simultâneo ao solo.

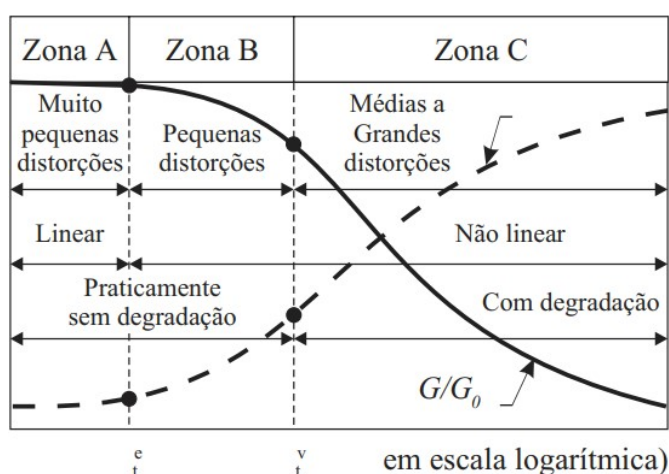
Outra aplicação viável das barreiras capilares é na manutenção da vegetação superficial de coberturas finais. Nesse caso, segundo Heibaum (2010) a instalação da barreira ocorre abaixo do solo cultivado, pois essa configuração melhora a retenção de água nas camadas superficiais de solos com grande permeabilidade e que contenha vegetação (HEIBAUM, 2010). Fernandes (2009) destaca também o papel das barreiras capilares na redução das emissões de CO₂ e CH₄, bem como no controle do fluxo de oxigênio para dentro do aterro.

3.4 Módulos de Rigidez e Elasticidade obtidos pelo Humbolt GeoGauge™

Para traduzir o comportamento da elasticidade e deformabilidade do solo é que os ensaios geofísicos *in situ* são empregados. Comumente os ensaios geofísicos são considerados métodos não destrutivos, uma vez que utilizam o princípio de propagação de ondas no solo ensaiado (ASSIS *et al.*, 2018). Esses ensaios têm a vantagem de não serem afetados por problemas nos processos de amostragem, além de permitir a caracterização de grandes volumes de solo (CORREIRA, 2004; SANTOS; CORREIRA, 2002).

Para Fonseca (2008) o comportamento típico de solos sob tensão pode ser relatado em 3 momentos: i) zona A das muito pequenas distorções, onde a rigidez assume um valor aproximadamente constante; ii) zona B das pequenas distorções, onde o módulo de deformabilidade decresce de modo muito acentuado; iii) zona C das médias a grandes distorções, onde a variação da rigidez com a deformação é muito menor e os valores da rigidez são fracamente mais baixos, conforme Figura 2.

Figura 2 – Comportamento do solo sob tensão



Fonte: Santos e Correira (2002)

O comportamento do solo frente a essas zonas é distinto, mesmo quando submetidos a carregamentos cíclicos equivalentes. Na zona A, por exemplo, o comportamento é elástico linear; na zona B é elástico não linear ou ligeiramente elastoplástico; enquanto na zona C o comportamento é completamente elastoplástico (SANTOS; CORREIRA, 2002).

Os métodos geotécnicos tradicionais de ensaio são considerados meios destrutivos. Estes, por sua vez, têm seu resultado influenciado pela experiência do operador e por um número elevado de variáveis que interferem no resultado final. Assim, a busca pelo desenvolvimento de métodos não destrutivos se faz necessário para a redução dessas interferências (LIMA *et al.*, 2019), a exemplo da aplicação do equipamento Humbolt Geogauge utilizado na presente pesquisa.

3.4.1 Módulo de Rigidez

A rigidez do solo pode ser definida como uma resistência encontrada pela vibração induzida durante a realização do ensaio (CHAN, 2012). Assim, a rigidez possui forte dependência com o nível de tensão-deformação e isso se dar, principalmente, por causa da propriedade não linear do solo. Portanto, para pequenas deformações a rigidez é relativamente alta e para deformações próximas do rompimento a rigidez diminui significativamente (VITALI, 2008). Para fins práticos é vantajoso determinar a rigidez no regime das muito pequenas deformações e usá-la como referência na determinação de perfis de rigidez (CLAYTON, 2011).

Para Santos e Cooreira (2002) os ensaios geofísicos de carregamento cíclico para determinação da rigidez a deformação permanente aumenta rapidamente enquanto a reversível diminui, uma vez que a rigidez do material aumenta. Em seguida, após um certo número de aplicações do carregamento, a deformação permanente tende a estabilizar e o comportamento do material pode então ser considerado elástico.

A rigidez é influenciada principalmente pela densidade máxima aparente do solo. Já a densidade do solo é diretamente influenciada pela porosidade e índice de vazios (LIMA *et al.*, 2019; SOBÓL *et al.*, 2020). Dito isto, altas densidades são obtidas por meio do processo de compactação, seja ele manual ou de laboratório.

3.4.2 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade é uma propriedade geotécnica do solo definido como a razão entre a tensão desvio e a deformação elástica resiliente (CORREIRA, 2004).

Para Lopes (2011) o processo de deformação no qual a tensão e a deformação são proporcionais é chamado de deformação elástica, ou seja, quanto maior esse módulo, menor será a deformação elástica resultante da aplicação de uma determinada tensão (maior rigidez).

O módulo de elasticidade dos solos pode ser obtido por meio de ensaios geofísicos *in situ*. Esses ensaios determinam o módulo de elasticidade utilizando a

vibração em regime permanente, que indicam a velocidade de propagação da onda na superfície ensaiada (CORREIRA, 2004). A exemplo dos ensaios realizados com o equipamento Humbolt GeoGauge, onde o módulo de elasticidade é testado por meio dos carregamentos cíclicos impostos pelo equipamento no solo ensaiado.

Para Sant'anna *et al.* (2003) quando obtido no cenário das pequenas deformações, o módulo de elasticidade é máximo pois é nessa configuração que o módulo corresponde à zona elástica linear de deformação, ou seja, não ocorrem deformações plásticas significativas no solo ensaiado. Ainda para os autores é justamente no regime elástico que o módulo de elasticidade atua, avaliando, assim a rigidez do material.

Para Correia (2004) é consenso que o módulo de elasticidade, quer seja obtido através de ensaios de laboratório, quer seja através de ensaios de campo é praticamente igual. Para tanto, os referidos ensaios devem ser executados com amostras homogêneas e satisfatoriamente indeformadas. Nesse caso, a realização de ensaios *in situ* se torna uma opção vantajosa quanto à confiabilidade dos resultados.

Independente do tipo de ensaio, as propriedades elásticas de solos com granulometria fina e deformações na ordem de 10^{-5} são praticamente as mesmas. Enquanto as deformações que ocorrem na zona das muito pequenas a pequenas deformações são da ordem de 10^{-6} a 10^{-4} (SANTOS; CORREIRA, 2002). De forma geral, os materiais com características mais granulares apresentam módulos de elasticidade com tendência de comportamento decrescente (TEIXEIRA *et al.*, 2015).

Alguns fatores podem influenciar no comportamento do módulo de elasticidade dos solos, tais como: estrutura do solo, intensidade das tensões aplicadas, histórico de tensões densidade, umidade, grau de saturação, método de compactação (FREITAS; REZENDE; GITIRANA, 2020).

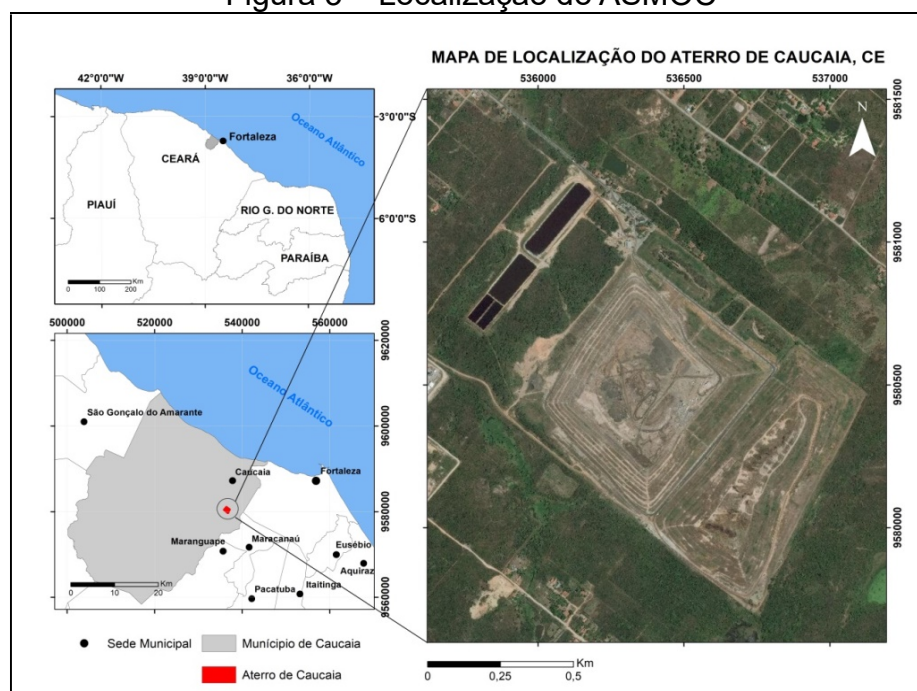
4 METODOLOGIA

4.1 A Área de Estudo

O Aterro Sanitário de Caucaia (ASMOC) está localizado no município de Caucaia, Região Metropolitana de Fortaleza. A área dista aproximadamente 30 km, pelas BR-222 ou BR-020, do centro da capital, conforme Figura 3.

O ASMOC iniciou suas operações em 1990 e, em 1998 passou a receber os RSU provenientes da cidade de Fortaleza. Sua área ocupa um total de 123,20 hectares (ha), sendo 78,47 ha destinados à disposição de resíduos; 32,15 ha a área de preservação ambiental; 7,04 ha a faixa de preservação de contorno; 3,19 ha a sistema viário interno; e, 2,35 ha a administração, urbanização e estacionamento³.

Figura 3 – Localização do ASMOC



Fonte: Autora (2022)

A tipologia realizada por Silva (2022) dos resíduos recebidos pelo ASMOC entre 2011 e 2020, em massa, teve a seguinte distribuição: 32,8% provém de coleta domiciliar de Fortaleza; 27,5% da coleta especial urbana (pontos de lixo); 10,4% de

³ Informações cedidas pela administração do ASMOC.

coleta particular (grandes geradores); 15,2 de entulho e podas; 1,2% de varrição pública, 4,7% de capina/raspagem; 8% é da coleta domiciliar de Caucaia e 0,2 é de serviços prestados pela Emlurb/Urbfor.

Até a data de seu encerramento, junho de 2021, o empreendimento encontrava-se em plena fase de operação, recebendo diariamente disposição e aterramento de aproximadamente 5.000 toneladas de RSU por dia.

Uma importante iniciativa aplicada ao ASMOC foi a instalação, em 2017, de um sistema de aproveitamento energético do biogás gerado através da biodegradação dos resíduos aterrados, em caráter inicialmente experimental. No entanto, em 2019 a comercialização do biogás atingiu aproximadamente 6.000 m³/hora de metano purificado⁴. Essa iniciativa coloca o ASMOC na rota de cidades que produzem energia limpa.

4.2 Etapas da pesquisa

A pesquisa foi realizada em três etapas. Na primeira etapa, foram realizadas buscas e leituras de artigos, monografias, dissertações, teses, relatórios técnicos, leis, decretos e normas nacionais e internacionais sobre o monitoramento geotécnico de aterros sanitários e das atuais aplicações do equipamento Humboldt GeoGauge™.

A segunda etapa compreendeu as visitas ao ASMOC. A Lateral E (Figura 4) foi escolhida para execução dos ensaios geotécnicos, em função dos problemas de vazão e qualidade dos gases que os poços de aproveitamento energético instalados nesta porção do aterro apresentaram, provavelmente resultado da entrada de ar atmosférico, pela cobertura final, para o interior do maciço.

Na segunda etapa foram realizados também ensaios de caracterização geotécnica e geomecânica do solo utilizado para execução da camada de cobertura final do ASMOC. Devido às dificuldades de campo, foram coletadas apenas 04 amostras deformadas, sendo 02 (duas) em uma berma e 02 (duas) em um talude para realização dos ensaios de caracterização geotécnica. Adicionalmente foi

⁴ Informações cedidas pela administração da planta de extração de biogás do ASMOC.

coletada também, em uma berma, uma amostra indeformada para ensaios de caracterização geométrica.

Figura 4 - Identificação da Lateral E, na área de estudo da pesquisa



Fonte: Autora (2022)

Na terceira etapa da pesquisa, foram utilizadas as informações obtidas pelo Humbolt GeoGauge nas campanhas para tabulação em planilha excel e posterior análise estatística dos dados com construção de gráficos boxplot e histogramas de frequência. Posteriormente foram realizadas considerações acerca dos resultados obtidos das caracterizações geotécnica e geomecânica realizadas no solo de cobertura do ASMOC.

4.3 O Humboldt GeoGauge™

O GeoGauge se apresenta como uma alternativa para obtenção dos módulos de rigidez e elasticidade de materiais frente aos variados métodos de levantamento de campo e laboratório. Tais métodos requerem grandes forças para produzir uma deflexão mensurável em uma superfície qualquer. A Figura 5 apresenta

uma vista superior do equipamento.

Figura 5 - Detalhes do equipamento Humboldt GeoGauge™ sobre o solo de cobertura do ASMOC



Fonte: Autora (2021)

O equipamento possui um pé circular que permite seu posicionamento diretamente no solo. Dessa maneira, o assentamento do pé com a superfície ensaiada tem que ser total. As principais características do GeoGauge são as seguintes:

- Peso: 10 kg;
- Altura: 28 centímetros;
- Diâmetro: 27 centímetros;
- Rigidez: 3 até 70 MN/m;
- Módulo de elasticidade: 26,2 até 610 MPa
- Coeficiente de Poisson: 0.20 até 0.50 em incrementos de 0.05;
- Profundidade de medida: 220 até 310 mm;
- Duração da bateria: 500 a 1.500 medidas;
- Temperatura de operação: 0 a 38°C.

Para a realização do ensaio, o equipamento impõe ao solo pequenos deslocamentos ($<1,27 \times 10^{-6}$) a 25 frequências diferentes entre 100 e 196 hertz (Hz).

A força máxima produzida pelo GeoGauge corresponde a 9 Newton (N) (ALSHIBLI; ABU-FARSAKH; SEYMAN, 2005).

O princípio de funcionamento do equipamento é a medição das tensões impostas à superfície do solo e a respectiva velocidade resultante, como uma função do tempo. Os resultados obtidos pelo equipamento, em ordem de exibição, são: 1) nível de ruído total, 2) o desvio padrão das 25 frequências emitidas, 3) o módulo de rigidez e 4) módulo de Young (também conhecido como de elasticidade, resiliência ou, ainda, de deformabilidade) do solo ensaiado.

Os resultados obtidos pelo GeoGauge estão inter-relacionados. A seguir são apresentadas algumas informações específicas em relação a cada um deles:

- A medição do nível de ruído total é dada como uma função da frequência, sendo exibida a relação sinal/ruído. Importante destacar que quanto mais rígido o material, maior será o valor do seu resultado (aproximadamente 10);
- Como resultado da média dos módulos de rigidez obtidos para cada uma das 25 frequências emitidas pelo equipamento, tem-se o desvio padrão. Este número varia para cada tipo de material ensaiado. Para os materiais moles (com rigidez próxima a 1MN/m) este número será pequeno e para materiais rígidos (com rigidez acima de 5MN/m), o mesmo se apresentará maior;
- A rigidez é definida como a força aplicada (F) e o seu respectivo deslocamento (δ), conforme Equação 1. Ela deriva diretamente da medição da velocidade superficial resultante da impedância, ou seja, da referida força aplicada na superfície do solo. A determinação da rigidez é para cada um dos 25 estágios de frequência, sendo a sua média então exibida. Ainda a frequências baixas, a impedância da superfície do solo corresponde à rigidez e é proporcional ao módulo cisalhante do solo;

$$K = F / \delta \quad (1)$$

- Para a determinação dos valores reais de módulos de elasticidade, o GeoGauge impõe tensões dentro da fase elástica do solo, pois é somente nesta fase que se pode determinar tais módulos, conforme Equação 2.

$$E_G = K (1 - \nu^2) / 1,77 R \quad (2)$$

Onde:

E_G = Módulo de Young

K = Valor de rigidez

ν = Coeficiente de Poisson

R = Raio exterior do anel da base (pé circular)

As medidas dos módulos de rigidez e elasticidade são derivadas do Coeficiente de Poisson (ν) do material, fornecido ao equipamento pelo usuário no momento do ensaio.

Para cada tipo de material, o GeoGauge apresenta uma precisão de resposta ao ensaio. No entanto, a precisão de medição (coeficiente de variação) do equipamento é menor que 10%. Portanto, é importante se atentar para não confundir a precisão de medição (repetibilidade dos resultados em um mesmo local) com a variabilidade da medição de dois locais diferentes na mesma área ensaiada.

4.4 Ensaio com o Humboldt GeoGauge™ no Solo de Cobertura Final do ASMOC

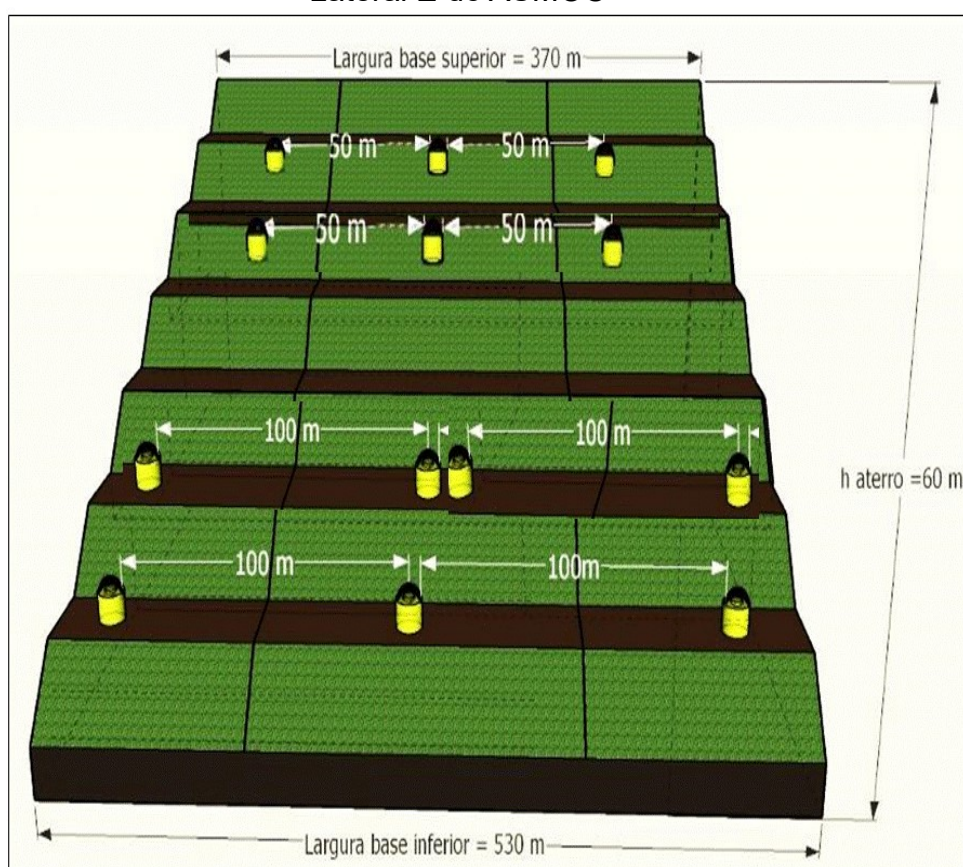
As medidas e estimativas dos módulos de rigidez e elasticidade do solo da cobertura final do ASMOC se iniciaram em maio de 2020 com encerramento em agosto do mesmo ano, sempre no turno da manhã, totalizando 5 campanhas de campo.

A cobertura final da célula pesquisada, até a última campanha de campo, era composta por 8 bermas e 8 taludes, além do topo do aterro. Dessa maneira, os pontos de amostragem foram ensaiados da base até o topo do aterro e em cada

ponto foram extraídas três leituras dos módulos de rigidez e deformação do solo para obtenção de uma média, conforme sugeriram Conde, Caldeira e Lopes (2010).

Objetivando obter o perfil geotécnico da Lateral E os pontos ensaiados foram distribuídos ao longo de 5 (cinco) perfis verticais com 16 pontos em cada um, totalizando 80 pontos de amostragem. A distância entre cada perfil foi de aproximadamente 100 metros. Porém, a inclinação do ASMOC é executada de maneira que o maciço, quando finalizado, adquira forma de pirâmide. Dessa maneira, as 6 camadas (3 bermas e 3 taludes) mais próximas do topo tiveram a distância dos seus perfis reduzida para 50 metros, conforme exemplificado na Figura 6.

Figura 6 - Figura esquemática ilustrando a distribuição dos pontos analisados na Lateral E do ASMOC



Fonte: Autora (2022)

O Coeficiente de Poisson (ν) adotado para a realização dos ensaios da cobertura final da Lateral E foi de 0,40. Silva (2017) também assumiu esse mesmo

valor ao realizar ensaios com o GeoGauge, conforme seu prévio conhecimento acerca dos solos aplicados no ASMOC.

Antes da realização dos ensaios a superfície foi raspada e limpa com uma pá de pedreiro. Vale salientar que a vegetação da área pesquisada é mantida rasa (Figura 7) para permitir o monitoramento constante dos poços de captação do biogás instalados na célula.

Figura 7 - Imagem da lateral E de cima do Humbolt GeoGauge™ sobre a superfície ensaiada na Lateral E do ASMOC



Fonte: Autores (2021)

Os procedimentos para a utilização do referido equipamento são padronizados pela Norma ASTM D6758-02 e foram adotados rigorosamente na presente pesquisa. Para assegurar uma área de contato razoável entre a base do equipamento e a superfície da camada, capaz de prover uma distribuição uniforme das tensões aplicadas pelo equipamento, aplicou-se uma leve prensagem e rotação do equipamento sobre a camada. Com o equipamento posicionado sobre a camada, iniciou-se o ensaio com duração aproximada de 75 segundos, quando, então, apresentaram-se, na tela do equipamento, os resultados das leituras.

4.5 O Monitoramento Geotécnico Realizado pelo Corpo Técnico do ASMOC

O atual monitoramento geotécnico do ASMOC é constituído por marcos superficiais (MS's), leituras de níveis de lixiviados, inspeções técnicas de campo,

histórico de disposição (características dos resíduos, geometria de projeto) e avaliação das condições operacionais (observação dos fatores influentes).

No entanto, apenas os MS's possuem um significativo histórico de leitura para realização de uma análise segura. Os MS's são utilizados tanto para a leitura dos deslocamentos verticais quanto dos horizontais gerados pelo maciço. A velocidade desses deslocamentos (em centímetros por dia) é o critério utilizado para avaliação das condições de estabilidade do maciço pelo corpo técnico operacional do ASMOC (Tabela 1). A metodologia para as leituras dos marcos é a do tipo planialtimétrica, ou seja, são efetuadas através de uma estação total.

Tabela 1 - Critérios de avaliação da velocidade dos deslocamentos do ASMOC

Velocidade de Deslocamento (cm/dia)	Periodicidade das Leituras Recomendadas	Níveis de Decisão e Ações Preventivas
$V \leq 2,5$	Semanal	Nível aceitável
$2,5 < V \leq 10$	2 dias	Intervenções localizadas
$10 < V \leq 35$	Diária	Paralisação das operações no aterro e intervenção localizada (drenagens)
$V > 35$	Diária	Definição de estado de alerta, paralisação das operações, acionamento da defesa civil para remoção da população existente nas áreas à jusante

Fonte: Relatório de monitoramento geotécnico do ASMOC, adaptado pela autora (2020)

Na presente pesquisa, a análise do histórico de leitura dos MS's não incluiu o cálculo de recalques acumulados, pois conforme indicou Simões *et al.* (2010) a interpretação de registros de campo deve ser feita criteriosamente, pois existe a possibilidade de o tempo inicial utilizado na calibração não coincidir com a idade do resíduo aterrado, podendo fornecer subestimações das deformações

Dito isto, a presente pesquisa se limitou à análise da movimentação dos MS's na qual foi realizada quanto às velocidades horizontal e vertical, ângulos de velocidade de deslocamento e sentidos das velocidades de deslocamentos horizontal e vertical.

Quanto às velocidades dos deslocamentos verticais, estes em específicos são classificados de acordo com as faixas de velocidade apresentadas na Tabela 2,

porém, a interpretação dos seus valores depende da análise conjunta com as velocidades dos deslocamentos horizontais no respectivo marco superficial em uma determinada seção (lateral) do aterro. Já a velocidade dos deslocamentos horizontais é calculada como sendo a razão entre o deslocamento horizontal parcial e o número de dias transcorridos entre os valores em questão.

A análise conjunta dos valores de deslocamento vertical e horizontal (ou velocidades de deslocamento vertical e horizontal) resulta nos ângulos de velocidade dos deslocamentos. Assim, é possível identificar as tendências de estabilização (adensamento) ou instabilização (tração com abertura de fissuras e trincas) dos maciços sanitários.

Já a leitura dos sentidos das velocidades dos deslocamentos resulta em movimentos de ruptura e escorregamento ou de adensamento (sentido de deslocamento horizontal) e de recalques ou de expansão/levantamento dos resíduos e da camada de cobertura (deslocamento vertical).

O cálculo do deslocamento vertical acumulado (recalque) é feito tomando-se a diferença entre os valores de leitura de cota do dia em análise e o valor caracterizado na instalação do marco superficial. Já o cálculo do deslocamento horizontal é feito com base na direção e sentido do deslocamento.

A partir do histórico de leituras dos MS's, iniciado em dezembro de 2020, foi possível realizar uma descrição do comportamento geomecânico do aterro em estudo, especificamente da Lateral E.

4.6 Caracterização do Solo Utilizado na Execução da Camada de Cobertura do ASMOC

A caracterização do solo empregado para execução da camada de cobertura final do ASMOC compreendeu a realização de ensaios geotécnicos *in situ* e em laboratório. Os ensaios permitiram um parecer geotécnico do solo.

4.6.1 Caracterização geotécnica do Solo da Camada de Cobertura do ASMOC

Os ensaios geotécnicos seguiram as normas técnicas inerentes aos solos. As amostras de solo coletadas da camada de cobertura final do ASMOC foram

submetidas aos seguintes ensaios:

- Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (NBR 6457/2016);
- Solo: Análise granulométrica (NBR 7181/88);
- Solo: Ensaio de compactação (NBR 7182/16);
- Solo: Determinação da densidade real (DNER-ME 093/94);
- Solo: Ensaio de adensamento unidimensional (NBR 16.853/2020);
- Solo: Determinação da massa específica aparente, *in situ*, com emprego do frasco de areia (ABNT/NBR 7185/16);
- Solo: Determinação do limite de liquidez (ABNT/NBR 6459/2017);
- Solo: Determinação do limite de plasticidade (ABNT/NBR 7180/2016).
- Classificação dos Solos Pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos – SUCS.

Para os ensaios de caracterização geotécnica do solo empregado na cobertura final do ASMOC optou-se por realizar 4 amostras (2 no talude, 2 na berma) para maior confiabilidade dos resultados. A caracterização geotécnica se dividiu em duas etapas: ensaios *in situ* (Figura 8) e em laboratório (Figura 9). Os ensaios se complementaram, possibilitando um parecer geotécnico do solo.

A partir dos resultados das massas específicas obtidas pelos ensaios de laboratório e campo foi calculado o Grau de Compactação (GC) do solo, conforme Equação 3 verificada na norma DNIT 137/2010.

$$GC = \frac{100 D_s}{D_{sref}} \quad (3)$$

Onde:

D_s = densidade do solo

$D_{s_{ref}}$ = densidade do solo após a aplicação de determinada pressão em laboratório

Além disso, a partir das curvas granulométricas calculou-se os coeficientes de Uniformidade (C_u) e de Curvatura (C_c) do solo de cobertura final do ASMOC, conforme equações 4 e 5 verificadas em Pinto (2006).

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \quad (4)$$

Onde:

C_u = coeficiente de não uniformidade

D_{60} = diâmetro tal que 60% do solo, em peso, têm diâmetros menores que ele

D_{10} = diâmetro tal que 10% do solo, em peso, têm diâmetros menores que ele

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \cdot D_{10}} \quad (5)$$

Onde:

C_c = coeficiente de curvatura do solo

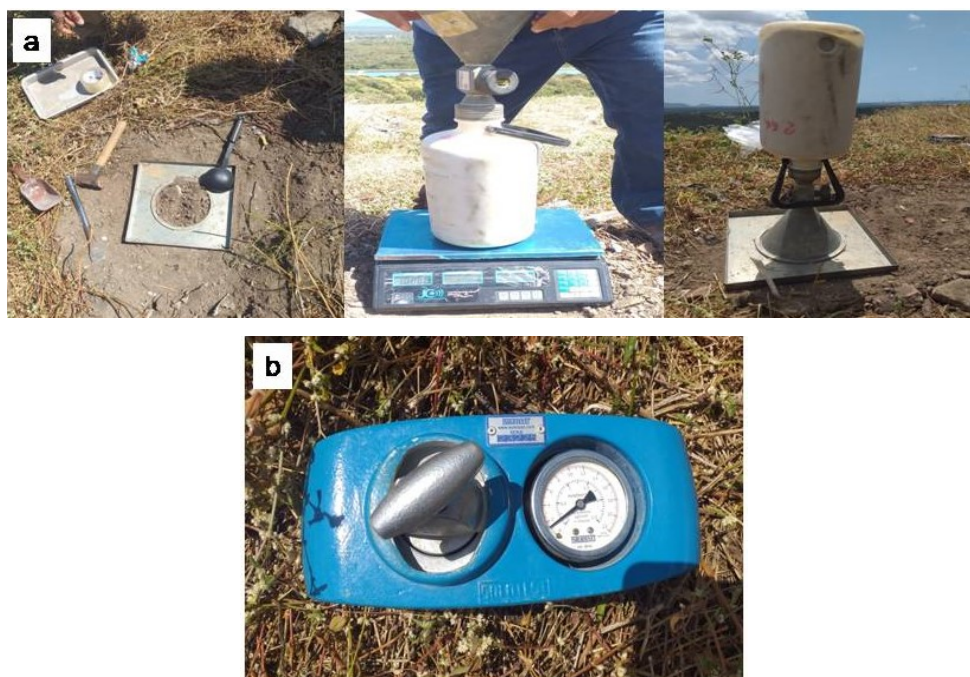
D_{60} = diâmetro tal que 60% do solo, em peso, têm diâmetros menores que ele

D_{30} = diâmetro tal que 30% do solo, em peso, têm diâmetros menores que ele

D_{10} = diâmetro tal que 10% do solo, em peso, têm diâmetros menores que ele

O compilado dos resultados dos ensaios *in situ* e em laboratório permitiu o conhecimento das propriedades físicas do solo empregado na camada de cobertura final do ASMOC. Esse conhecimento possibilita verificar se o solo da cobertura final do ASMOC atende aos parâmetros mínimos necessários frente às normas reguladoras para promover uma eficiente estabilidade geotécnica ao sistema.

Figura 8 - Caracterização física do solo *in situ*: a) massa específica aparente, b) umidade



Fonte: Autora (2021)

Figura 9 - Caracterização física do solo em laboratório: a) granulometria por peneiramento, b) umidades natural e higroscópica, c) limites de Artteberg, d) compactação, e) densidade real dos grãos



Fonte: Autora (2021)

4.6.2 Caracterização Geomecânica do Solo da Camada de Cobertura do ASMOC

Os ensaios de caracterização do comportamento geomecânico seguiram as normas técnicas inerentes a solos e foram coletadas 02 amostras de solo (01 no talude e 01 na berma) indeformadas da camada de cobertura final do ASMOC e submetidas aos seguintes ensaios:

- Solo - Ensaio de Adensamento unidimensional (NBR 16853/20);
- Solo - Ensaio de resistência ao cisalhamento triaxial (ASTM D4767)

O ensaio de adensamento unidimensional foi executado com a finalidade de estudar o comportamento de deformabilidade da camada de cobertura do ASMOC. A partir desse ensaio, foi possível determinar os seguintes parâmetros: coeficiente de adensamento (C_v), tensão de pré-adensamento (σ'_{pa}), coeficiente de compressão (C_c) e coeficiente de re-compressão (C_r). Além disso, os módulos edométricos (E'_{oed}) foram estimados a partir da Equação 6 conforme Velloso e Lopes (2004).

$$E'_{oed} = \frac{\Delta\sigma_v}{\Delta\epsilon_v} = \frac{1}{mv} \quad (6)$$

Onde:

$\Delta\sigma_v$ = variação da tensão vertical efetiva aplicada

$\Delta\epsilon_v$ = variação da deformação específica vertical ocorrida

mv = inverso da compressibilidade volumétrica

A partir da determinação desses parâmetros é possível prever o comportamento dos recalques da camada de cobertura final e o tempo de ocorrência dos recalques que ocorrerão na estrutura ao longo do tempo.

O ensaio de adensamento foi realizado em 02 (duas) amostras indeformadas retiradas *in situ* da camada de cobertura final. Utilizou-se para coleta

uma caixa nas dimensões 20x20cm, conforme a Figura 10.

Figura 10 - Retirada da amostra indeformada na camada de cobertura final do ASMOC



Fonte: Autora (2021)

O ensaio de adensamento foi realizado de acordo com os procedimentos prescritos na NBR 16.853/2020. Primeiramente retirou-se um corpo de prova das amostras indeformadas moldando-o no anel metálico próprio do equipamento. Em seguida pesou-se o conjunto anel e solo, confinando-o na caixa edométrica, conforme Figura 11.

Figura 11- Ensaio de adensamento: a) moldagem e retirada do corpo de prova, b) pesagem do conjunto anel e solo, c) confinamento do corpo de prova



Fonte: Autora (2021)

Na segunda etapa do ensaio, aplicou-se a carga de acomodação, obedecendo a um tempo mínimo de 10 minutos prevalecendo, dessa maneira, a condição saturada. Após isso, foi aplicada uma sequência de tensões com carregamento de 25, 100, 200, 400 e 800 KPa seguido por descarregamento.

O principal objetivo desse ensaio é determinar as propriedades de adensamento do solo, caracterizadas pela velocidade e magnitude das deformações, quando o solo é lateralmente confinado e axialmente carregado e drenado.

A variação da umidade do material produz um material com diferentes resistências não drenada e, com isso, diferentes módulos de elasticidades. Em linhas gerais, a umidade altera significativamente os módulos de elasticidade do material ensaiado.

Quanto ao ensaio de compressão triaxial, na presente pesquisa optou-se por realizar os ensaios de compressão triaxial do tipo adensado e drenado (CIU) no qual o corpo de prova é submetido aos processos de saturação (por percolação e contra-pressão) e com um único estágio de carregamento. Foram realizados uma série de 3 ensaios para 1 (uma) única amostra de solo da cobertura final do ASMOC, variando apenas as tensões confinantes aplicadas. Tais tensões simulam a tensão máxima que o solo está submetido em campo, portanto, as tensões de confinamento adotadas foram de 50, 100 e 200 kPa. A velocidade da prensa triaxial adotada para a realização dos ensaios foi de 0,1219 mm/min.

O ensaio de compressão triaxial é um dos ensaios mais precisos para a determinação das propriedades de resistência de solos em laboratório. Essas propriedades são traduzidas pelos valores da coesão (kPa) e ângulo de atrito (°). Enquanto o módulo de elasticidade representa o comportamento tensão x deformação. A Equação 7 foi aplicada para estimar o módulo de elasticidade extraído do ensaio triaxial.

$$E = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_1} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\varepsilon_1} \quad (7)$$

Onde:

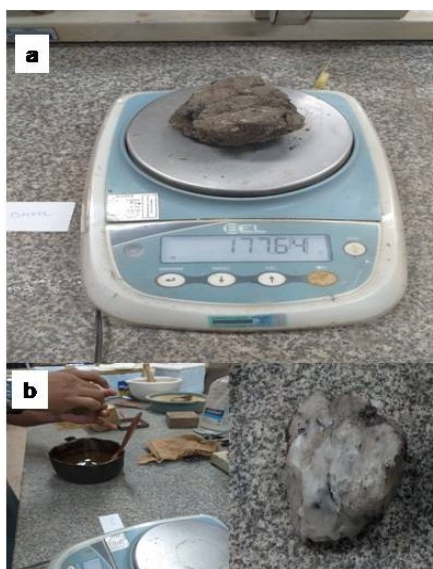
$\sigma_1 - \sigma_3$ = desvio da tensão normal

ϵ_1 = deformação axial

Quanto à moldagem do CP para o ensaio de compressão triaxial, a heterogeneidade do solo empregado na cobertura final do ASMOC impossibilitou a retirada de um corpo de prova (CP) indeformado. Assim, optou-se por realizar algumas adaptações, como a aplicação do método da balança hidrostática.

O método da balança hidrostática foi aplicado na tentativa de reproduzir o peso específico aparente da amostra de solo da cobertura do ASMOC, caso ela tivesse sido coletada satisfatoriamente indeformada. Primeiramente talhou-se da amostra de solo uma sub-amostra em um formato mais ou menos cilíndrico com dimensões aproximadas de 5x5cm, com posterior pesagem da mesma. Feito isto, realizou-se o procedimento de parafinagem (Figura 12), repetindo-se, em seguida, a pesagem do conjunto amostra e parafina.

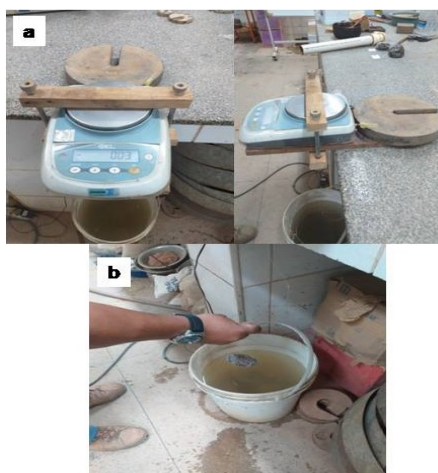
Figura 12 - Método da balança hidrostática: a) pesagem da sub-amostra após talhada, b) parafinagem da sub-amostra



Fonte: Autora (2021)

Em seguida realizou-se a pesagem do conjunto sub-amostra e parafina após imerso na água, uma vez que esse ensaio se utiliza dos conceitos de empuxo exercido pela água quando há imersão de sólidos irregulares. Para tanto, adaptou-se a balança com uma estrutura que permitisse tal pesagem, conforme Figura 13.

Figura 13 - Pesagem do conjunto sub-amostra e parafina imerso na água: a) balança com estrutura adaptada, b) imersão, na água, do conjunto sub-amostra e parafina



Fonte: Autora (2021)

Após essa etapa realizou-se, cuidadosamente, a retirada de toda a parafina da sub-amostra. Por fim, retirou-se uma quantidade da sub-amostra para determinação da umidade do solo pelo método de secagem em estufa (NBR 6457/2016).

O método da balança hidrostática permite a obtenção do volume do corpo de prova pelo deslocamento da água após imersão da sub-amostra parafinada e da massa específica aparente por pesagem.

A moldagem dos CP's seguiu as recomendações da norma ASTM D4767, porém algumas adaptações foram necessárias. Enquanto as diretrizes para moldagem dos CP's foram elaboradas conforme os resultados da massa específica aparente determinada anteriormente pelo método da balança hidrostática.

Primeiramente, a amostra retirada da cobertura final do ASMOC foi destorroada. Em seguida, passou-se a amostra em uma peneira com abertura de 9,52 mm, para então retirar 3 Kg de solo. Após a pesagem adicionou-se 200ml de

água, conforme Figura 14.

Figura 14 - Preparo da amostra para moldagem dos CP's utilizados nos ensaios triaxiais: a) Destorroamento da amostra, b) peneiramento da amostra



Fonte: Autora (2021)

Em seguida, a moldagem do CP foi executada em 3 camadas com 130g da amostra de solo utilizando a energia de Proctor normal para compactação, conforme Figura 15.

Após moldado o CP é posicionado sob uma pedra porosa no pedestral da câmara triaxial, na qual passou pelo processo de saturação com jatos de água para expulsão de possíveis bolhas de ar. Em seguida o CP foi envolvido por duas membranas impermeáveis de látex, nas quais foram fixadas com elásticos de borracha na base e anéis o'ring no topo a fim de vedar o CP. A câmara triaxial foi então fechada e preenchida com água, conforme Figura 16.

Figura 15 - Moldagem do CP para os ensaios triaxiais: a) pesagem das camadas de solo, b) preenchimento da cápsula de moldagem, c) desmoldagem do CP



Fonte: Autora (2021)

Figura 16- Montagem da célula triaxial: a) colocação do CP sob pedra porosa; b) envolvimento do CP com as membranas látex, c) preenchimento da célula triaxial com água



Fonte: Autora (2021).

Quanto à saturação do CP, esta ocorreu por percolação e contra-pressão. O principal objetivo da saturação é induzir um estado crítico no CP, diminuindo, portanto, a resistência do solo.

Assim, aplicou-se uma pressão confinante de 18KPa. Em seguida deu-se início ao processo de saturação por percolação por um período mínimo de 4 horas. Quanto à saturação por contra-pressão, esta foi realizada com acréscimos de diferentes contra-pressões, objetivando minimizar as obstruções ao fluxo causadas por bolhas de ar. A aplicação das contra-pressões ocorreu até o CP atingir uma saturação acima de 90%.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização geotécnica do solo de cobertura do ASMOC

A distribuição granulométrica média de quatro amostras retiradas da cobertura (duas da berma e duas do talude) do ASMOC se encontra detalhada na Tabela 2.

Tabela 2: Distribuição granulométrica dos solos da camada de cobertura do ASMOC, conforme frações adotadas pelo SUCS

Componente (%)	Tamanho (mm)	Berma	Talude
Pedregulho	>4,8	15	7,5
Areia grossa	2,00 - 4,8	4	2,5
Areia média	0,42 - 2,00	19	31
Areia fina	0,074 - 0,42	51	41
Silte/Argila	<0,074	11	18

Fonte: Autora (2022)

Muito embora existam algumas variações na proporção de pedregulhos entre as camadas de berma e talude, cerca de 70% da composição granulométrica dos solos apresenta textura concentrada nas frações de areia fina e média. Somada a proporção dos demais componentes, a classificação do solo, conforme SUCS, para berma foi de areia argilosa e para o talude foi de areia siltosa. Comportamento semelhante foi encontrado por Belfort *et al.* (2019): 82%; Barroso (2008): 58%; Santos (2015): 63%.

Os Índices de Plasticidade (IP) do solo de cobertura da berma foi de 5%, enquanto do talude esse valor foi de 3%. Quanto aos resultados dos limites de liquidez o solo estudado pode ser classificado como não plástico, pois não apresentou comportamento para esse índice em específico.

O tipo e a composição do solo usado para cobertura de aterros no Brasil não possuem regulamentação própria. A USEPA (2003) recomenda o uso de solos

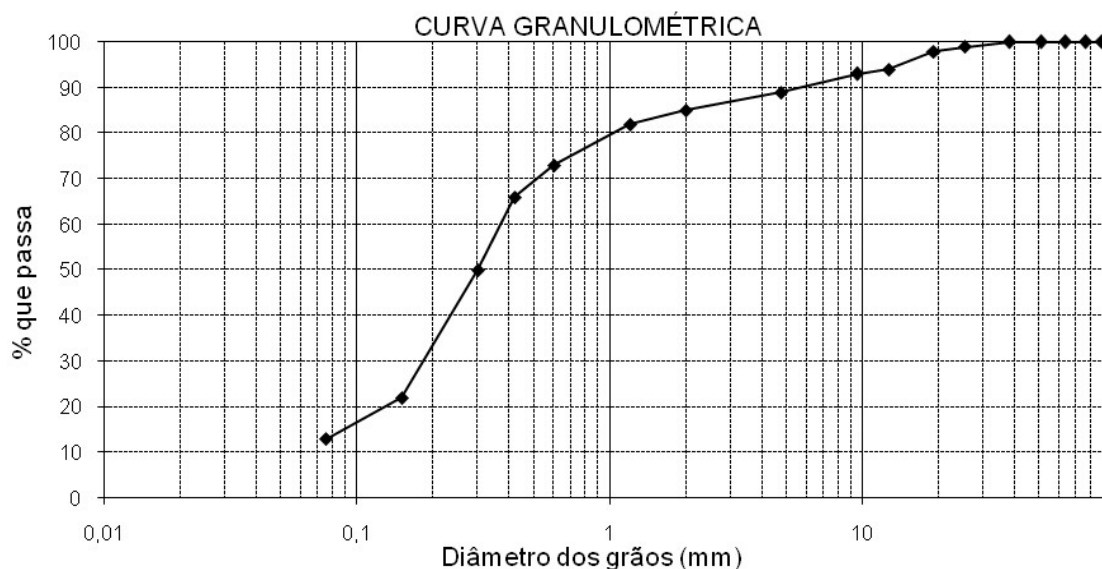
com porcentagem predominante de finos (silte/argila) entre 30 e 50%, enquanto para solo deve ser composto por mais de 30% de finos.

Os solos aplicados na cobertura do ASMOC possuem, em média, 11 e 18% de finos para berma e talude, respectivamente, não se adequando, portanto, às diretrizes da USEPA e CETESB

A comparação entre os resultados obtidos para a camada de cobertura do ASMOC com os obtidos de outras pesquisas (Belfort *et al.*, 2019; Barroso, 2008; Santos, 2015) mostra um predomínio de solos do tipo areia siltosa e argilosa em outros aterros do Brasil, como por exemplo no Rio Grande do Sul (Callegaro; Santos; Pinheiro, 2019); Rio de Janeiro (Barroso, 2008; Araújo, 2016) e Pernambuco (Costa, 2018).

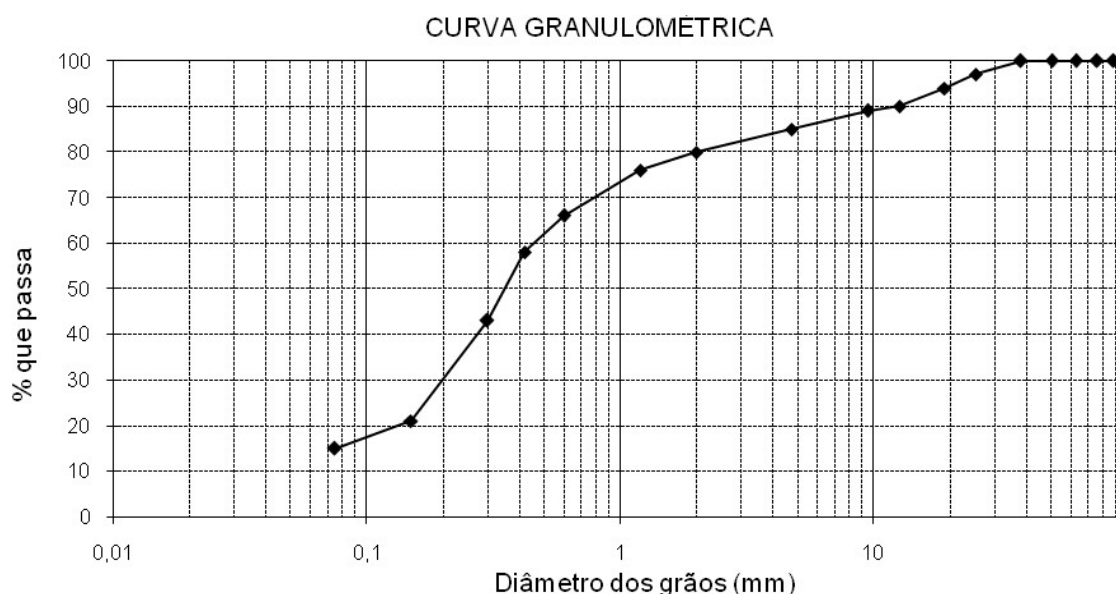
A partir da distribuição granulométrica dos solos aplicados na cobertura final do ASMOC, foram confeccionados os gráficos para as curvas granulométricas para a berma e talude estudados, conforme Gráficos 1 e 2.

Gráfico 1 – Representação da curva granulométrica do solo de cobertura da berma da área pesquisada



Fonte: Autora (2022)

Gráfico 2 - Representação da curva granulométrica do solo de cobertura do talude da área pesquisada



Fonte: Autora (2022)

Das curvas granulométricas retiraram-se os coeficientes de uniformidade (C_u) e de curvatura (C_c) o solo em estudo. Os valores de C_u se apresentaram próximos para a berma e talude estudados: 5,33 e 5,15, respectivamente. Esses valores classificam o solo de cobertura do ASMOC quanto à sua granulometria em medianamente uniforme, assim, com partículas de tamanhos relativamente desiguais.

Os valores de C_c também se apresentaram próximos para berma e talude pesquisados: 2,85 e 2,66, respectivamente. Para Araújo *et al.* (2016) valores de C_c contido na faixa de 1 a 3 são classificados como um solo bem graduado. Dessa maneira, os valores de C_c encontrados para o solo em estudo classificam-o como bem graduado. Para Pinto (2006) solos bem graduados apresentam alta eficiência quando submetidos à compactação, uma vez que considera a predominância da fração de partículas finas que ocupam os vazios deixados pelas partículas maiores.

Considerando os resultados de C_c e C_u encontrados para o solo de cobertura do ASMOC, observa-se um solo formado por partículas de diferentes tamanhos. Segundo Araújo *et al.* (2016) a não uniformidade na distribuição granulométrica das partículas é apropriado para solos de cobertura de aterros, uma

vez que é a configuração granulométrica do solo que rege o comportamento da cobertura final quanto à capacidade de retenção de água (SANTOS, 2015), resistência ao cisalhamento (LIMA *et al.*, 2019), formação de fissuras (COSTA, 2015), permeabilidade à água (D'ANGELO, 2016; SANTOS; CORREIRA, 2002; Araújo *et al.*, 2016); expansibilidade do solo (NASCIMENTO *et al.*, 2021) e outros.

O tipo e a composição do solo usado para cobertura de aterros no Brasil não possuem regulamentação própria. A USEPA (2003) recomenda o uso de solos com porcentagem predominante de finos (silte/argila) entre 30 e 50%, enquanto para CETESB (1993) e Diretiva do Conselho da União Europeia (1999) o solo deve ser composto por mais de 30% de finos.

Os solos aplicados na cobertura do ASMOC possuem, em média, 11 e 18% de finos para berma e talude, respectivamente, não se adequando, portanto, às diretrizes da USEPA e CETESB.

Os resultados das análises de massa específica dos grãos encontrados nos solos de cobertura do ASMOC juntamente com os dados obtidos na literatura estão apresentados na Tabela 3. Os resultados se apresentaram próximos, variando entre 2,72 e 2,61g/cm³.

Tabela 3 - Massa específica dos solos de cobertura de aterros sanitários na literatura

Autores	Local	Massa Específica dos Grãos (g/cm³)
Dados da Pesquisa	Ceará	Berma - 2,65 Talude - 2,60
Magalhães e Soares (2021)	Ceará	2,70
Santos e Correira (2002)	Rio de Janeiro	2,56
Macedo (2016)		2,62
Almeida (2017)	Recife	2,72
Nascimento <i>et al.</i> (2021)		2,61
Broichsitter, Gerke e Horn (2018)	Alemanha	2,65
	Rio Grande do Sul	2,66
Teixeira <i>et al.</i> (2009)	Rio Grande do Sul	2,54
	São Paulo	2,76

Fonte: Autora (2022)

A proximidade entre os resultados da Tabela 3 se dar porque a densidade real dos grãos varia pouco de solo para solo. Além disso, por si só esse parâmetro não possibilita um enquadramento geotécnico de uso como material para coberturas finais. Contudo, é de fundamental importância para caracterizar o solo quanto aos seus índices físicos.

Além disso, a densidade real dos grãos tem relação direta com a granulometria dos solos, com destaque para predominância da areia fina e média no solo da cobertura do ASMOC. Dessa maneira as partículas menores pesam menos, detendo os menores valores de densidade (SANTOS, 2015).

A Tabela 4 apresenta os resultados das médias dos valores obtidos para as massas específicas secas máxima e natural e das umidades obtidas por meio de ensaios de laboratório (compactação Proctor normal) e campo (métodos do frasco de areia e da garrafa speedy).

Tabela 4 - Dados obtidos nos ensaios de Proctor normal, frasco de areia e garrafa speedy e umidade pelo método da estufa

Ensaio	Parâmetro	Berma	Talude
Compactação Proctor Normal	Umidade Ótima	13,8	13,0
	(%) de Laboratório		
	Massa Específica		
	Aparente Seca	2,1	1,8
	Máxima (g/cm ³) de laboratório		
Método do Frasco de Areia	Massa Específica		
	Aparente seca	1,7	1,5
	natural (g/cm ³) <i>in situ</i>		
Método da Garrafa Speedy	Umidade (%) <i>in situ</i>	2,2	2,5
Método da Estufa	Umidade (%)	3,2	3,6
	Higroscópica		

Fonte: Autora (2022)

A partir das massas específicas obtidas pelos ensaios de laboratório e campo extraiu-se o GC do solo das camadas de cobertura da área estudada, que se apresentaram entre 88% e 62% para bermas e taludes, respectivamente. Esses valores são considerados baixos quando comparados aos encontrados em pesquisas realizadas em outros aterros brasileiros: Antunes *et al.* (2018) encontraram um GC de 91,84%; Franceschet (2006) encontraram variações de 96,14, 97,58 e 102,55% para três distintos aterros.

Os valores de GC são influenciados pelo tipo de equipamento compactador utilizado durante a construção da estrutura. O espalhamento do solo de cobertura do ASMOC é realizado com trator de esteira D6T e depois compactado com equipamento de rolo liso, o que provavelmente justifica os baixos valores de GC encontrados para as camadas do ASMOC.

Destaca-se que o GC é um índice do solo que pode ser manipulada durante a execução das camadas. Assim, sua determinação se torna um instrumento de controle geotécnico durante a execução de camadas, uma vez que a compactação de solos das coberturas de aterros no Brasil é realizada de maneira precária, ou seja, não ocorre o mínimo controle durante a compactação.

Como é possível observar na Tabela 4, os valores de umidades obtidas em laboratório (método da estufa) tanto para as bermas como para os taludes se apresentaram superiores quando comparadas com as obtidas *in situ* (método da garrafa speedy). Esses resultados se devem principalmente pelo método da estufa ser mais preciso e seguro, uma vez que determina o teor de umidade do solo pela remoção do conteúdo de água (MORITZ, 2012). Por outro lado, a umidade determinada com uso da garrafa speedy é menos preciso, e se baseia na reação química entre a água contida no solo e o carbureto de cálcio, com a umidade presente no solo, medida através da pressão gerada no interior da garrafa a partir da produção do gás acetileno (VIONE, 2007).

Ainda da Tabela 4 é possível extrair o comportamento das massas específicas das amostras. Assim, observou-se que os maiores valores foram obtidos em laboratório (método de compactação Proctor normal) quando comparado às massas obtidas *in situ*. Esse cenário justifica a utilização da compactação manual no ensaio de Proctor normal, na qual torna mais difícil atingir a mesma energia pelo

ensaio de frasco de areia, conforme afirmou Batista (2012).

Valores próximos às massas específicas e umidades ótimas obtidas nessa pesquisa por meio do ensaio de Proctor normal foram encontrados por Silva (2022): 1,86 g/cm³ e 12,5% e Almeida *et al.* (2010): 1,93 g/cm³ e 12,4%. Esses autores também estudaram o solo de cobertura do ASMOC, com uma década de diferença. Isso indica que a jazida, provavelmente, continua sendo a mesma quando da execução das camadas do ASMOC, daí a semelhança entre os resultados.

5.2 Caracterização geomecânica do solo de cobertura do ASMOC

5.2.1 Ensaio de compressão triaxial

O ensaio de compressão triaxial foi do tipo adensamento anisotrópico não drenado, objetivando simular as condições que ocorrem em campo. A execução dos ensaios triaxiais consistiu em duas fases: a primeira foi de saturação e adensamento e a segunda fase de carregamento axial até a ruptura.

Ensaio de cisalhamento em solos arenosos são feitos de forma que as pressões neutras se dissipem, logo, os resultados são considerados em termos de tensões efetivas. Na realização do ensaio na amostra de solo da cobertura final do ASMOC foram aplicadas pressões hidrostáticas (σ_3) no corpo de prova moldado com o solo amostrado e foi observado os resultados de pressões axiais (σ_1) correspondente para cada tensão aplicada, conforme detalhado na Tabela 5.

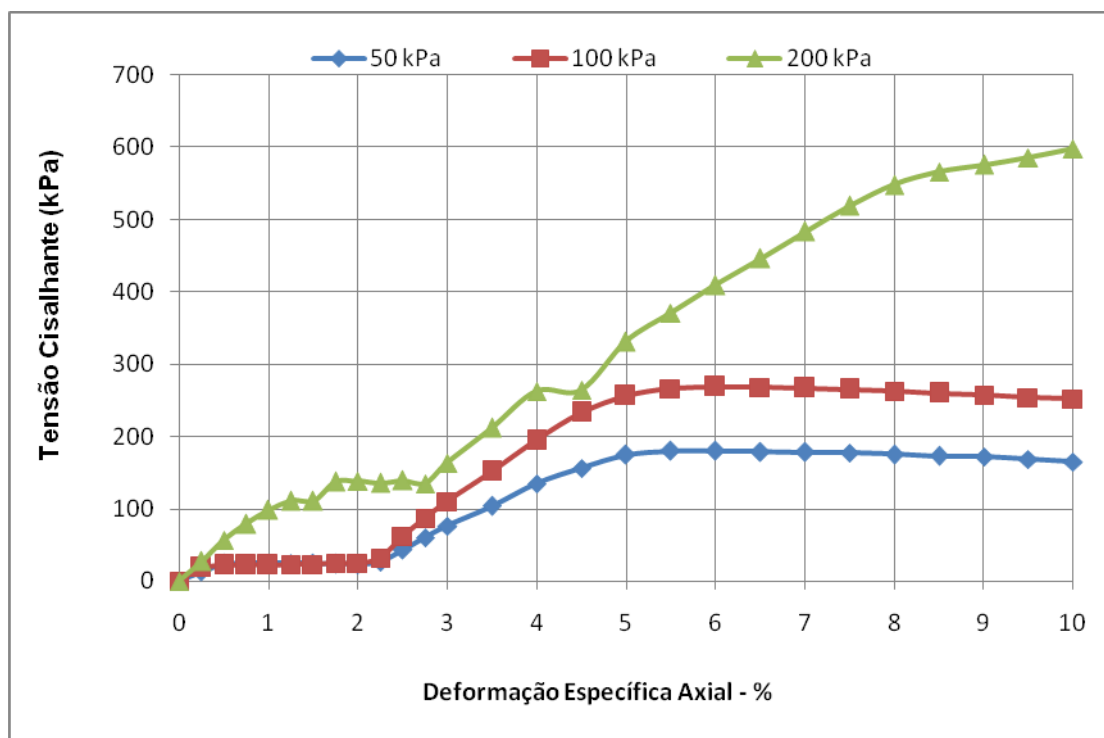
Tabela 5 – Pressões hidrostáticas e axiais aplicadas no corpo de prova moldado com o solo de cobertura do ASMOC

	Tensões Efetivas	
	σ_3 (kPa)	σ_1 (kPa)
Corpo de prova	50,11	230,21
	99,37	367,95
	199,89	798,04

Fonte: Autora (2022)

Conforme as tensões hidrostáticas e axiais demonstradas na tabela 5, é possível retratar as curvas encontradas para a relação de tensão cisalhante e de deformação específica axial da amostra, conforme Figura 17.

Figura 17 - Relação Tensão x Deformação do solo de cobertura do ASMOC



Fonte: Autora (2022)

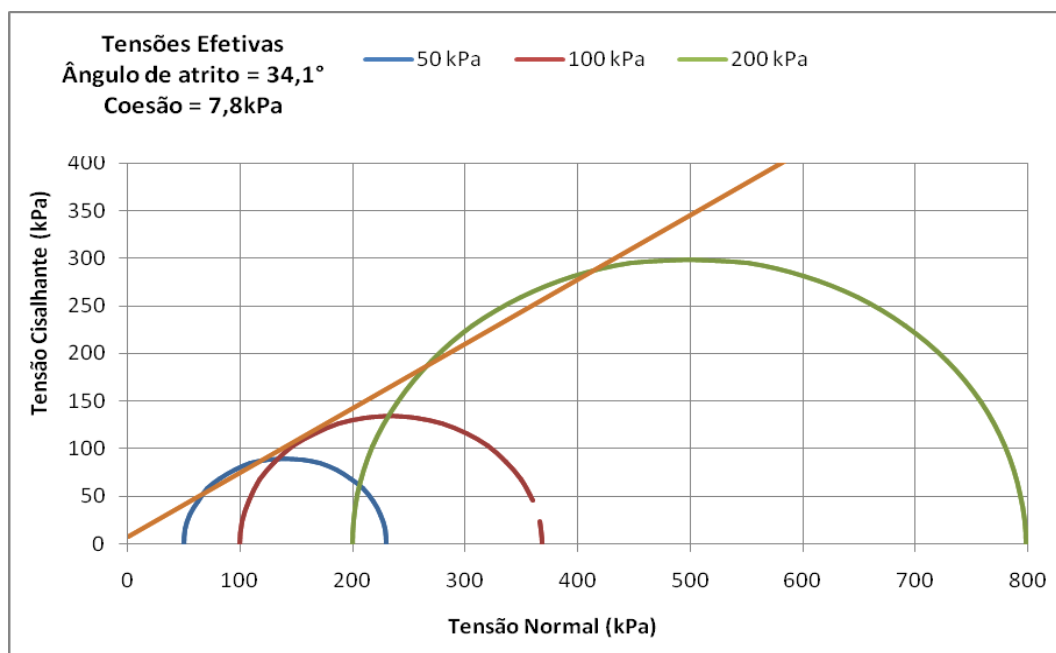
De acordo com a Figura 17, para tensão normal de 50kPa obteve-se uma tensão cisalhante de 180,10 kPa; para tensão normal de 100kPa, a cisalhante foi 268,60kPa e para a de 200kPa a cisalhante foi de 598,10 kPa. Dessa maneira, é possível observar tanto uma relação de pico como de progressão para todas as tensões normais aplicadas. Conforme Lira *et al.* (2020) esse cenário indica que o solo ensaiado se comporta como friável

Os valores resultantes da relação de tensão x deformação encontrados nessa pesquisa são típicos de solos que possuem areia em sua composição. Conforme Marangon (2018) solos arenosos têm alta compactidade devido principalmente à distribuição granulométrica e ao formato dos grãos. Além disso, a areia possui mais atrito que coesão, permitindo um rápido cisalhamento da amostra.

No geral, o comportamento da relação tensão x deformação descrito acima é recorrente na literatura especializada em solos de cobertura de aterros (LIRA *et al.*, 2020; MONTALVAN; BOSCOV, 2019). Ademais, em termos de comparação deve-se resguardar as particularidades operacional de cada aterro e às diferenças estruturais das amostras avaliadas.

Para determinar os parâmetros de resistência e a tensão de ruptura foi utilizado a envoltória de Mohr-Coulomb, conforme demonstrado na Figura 18.

Figura 18 - Envoltórias de Mohr-Coulomb das tensões efetivas aplicadas no solo de cobertura do ASMOC



Fonte: Autora (2022)

Foi observado na Figura 18 uma coesão de 7,8 kPa e um ângulo de atrito no valor de 34,1°. Conforme mencionado, o solo da cobertura final do ASMOC foi classificado como arenoso siltoso argiloso, o que justifica o elevado ângulo de atrito encontrado nessa pesquisa. Conforme Almeida (2017) esse parâmetro é o maior responsável pela resistência ao cisalhamento em solos arenosos. A tabela 6 mostra alguns resultados de parâmetros de resistência encontrados na literatura para solos de cobertura de aterros.

Tabela 6 - Parâmetros de resistência de solos de cobertura de aterros sanitários na literatura em comparação aos obtidos na presente pesquisa

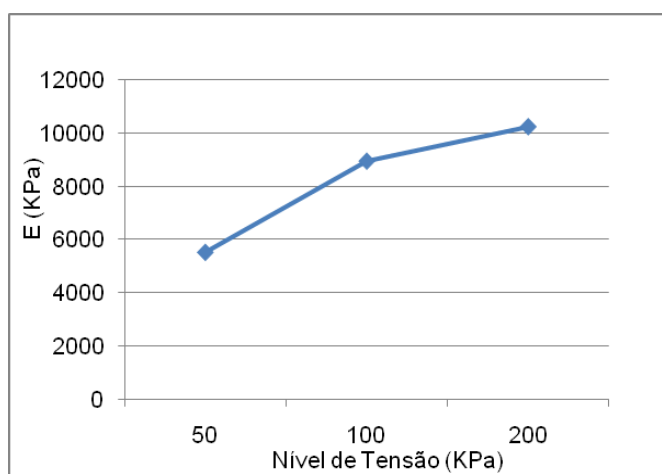
Literatura	Local	Ângulo° (ϕ)	Coesão kPa
Dados da Pesquisa	Ceará	34,1	7,8
Silva (2005)	Botucatu	35,1	1,4
Tavares <i>et al.</i> (2018)	Belo Horizonte	27	19
Medeiros, Noberto e Mariano (2018)	São Paulo	20	10
	Bahia	30	20
		28	5
Camargo (2012)	Rio Grande do Sul	22,7	2,3

Fonte: Autora (2022)

Em linhas gerais, ótimos valores para os ângulos de coesão e atrito são necessários para assegurar a estabilidade de aterros. Esses parâmetros podem ser aplicados como critérios para aceitação em projetos de aterros, pois permitem uma eficiente avaliação com possibilidade de enquadramento geotécnico para camadas que são executadas com solos compactados, conforme Benson e Daniel (1990).

O Módulo Secante do Solo (E) foi estimado para a relação tensão desvio x deformação axial por meio de equação numérica, conforme Figura 19.

Figura 19 - Módulo secante do solo retirado do solo de cobertura do ASMOC



Fonte: Autora (2022)

Conforme se observa na Figura 19, os módulos secantes aumentam linearmente com o aumento do nível de tensão.

5.2.2 Ensaio de adensamento endométrico

Os índices de vazios inicial (e_0), de compressão (C_c) e recompressão/expansão (C_s) obtidos por meio dos ensaios de adensamento estão exibidos na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros de adensamento da amostra do solo de cobertura do ASMOC

Amostra	Índices de Adensamento			
	e_{Inicial}	e_{Final}	C_c	C_r
Berma	0,099	0,012	0,164	0,013
Talude	0,128	0,012	0,212	0,014

Fonte: Autora (2022)

Conforme se observa, os índices de vazios finais da amostra de solo tanto da berma como do talude foram 0,012. Para Barroso (2008) o índice de vazios é influenciado pelo modo como o solo é preparado para ser ensaiado, no qual tem efeito considerável no tamanho e disposição dos vazios entre as suas partículas. Para Pereira (2000) esses vazios alteram-se com o tempo, daí a importância de aplicar corretamente esse coeficiente, uma vez que o uso indiscriminado pode minimizar sua credibilidade.

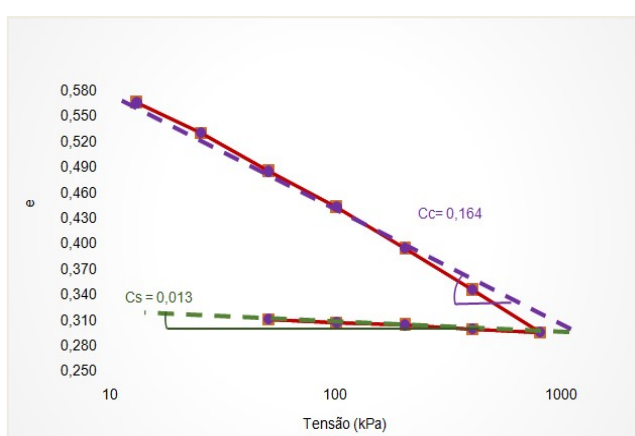
O ensaio de adensamento do solo ocorre ao longo do tempo quando o solo decresce de volume pela redução de seu índice de vazios. Quando o solo ensaiado se encontra na situação de saturação a redução dos vazios se dá pela expulsão da água (VIEIRA, 2013).

Já os índices de compressão do solo da berma e do talude foram, respectivamente, 0,164 e 0,212. Já os índices de recompressão/expansão do solo da berma e do talude foram 0,013 e 0,014, respectivamente. Segundo Lira (2017)

esses índices correspondem à inclinação da reta de compressão virgem e tem aplicabilidade principalmente em cálculos de recalques imediatos e ao longo prazo.

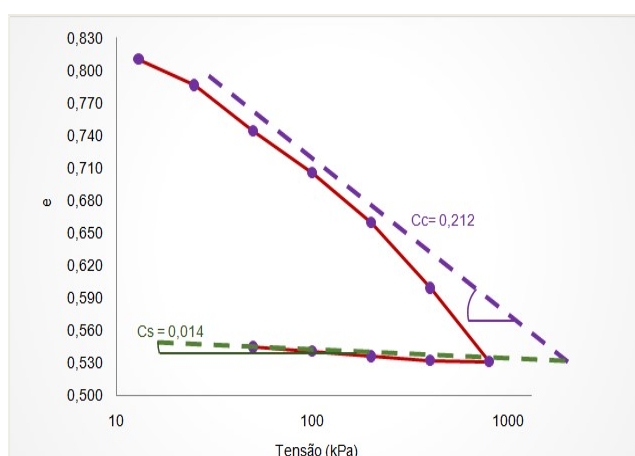
A partir dos ensaios de adensamento foi possível também construir gráficos relacionando os índices de vazios com as tensões efetivas aplicadas nas amostras de solo. As curvas de adensamento dos solos de cobertura da berma e do talude estão exibidas nos Gráficos 3 e 4, respectivamente.

Gráfico 3 - Representação das curvas de adensamento do solo de cobertura da berma



Fonte: Autora (2022)

Gráfico 4 - Representação das curvas de adensamento do solo de cobertura do talude



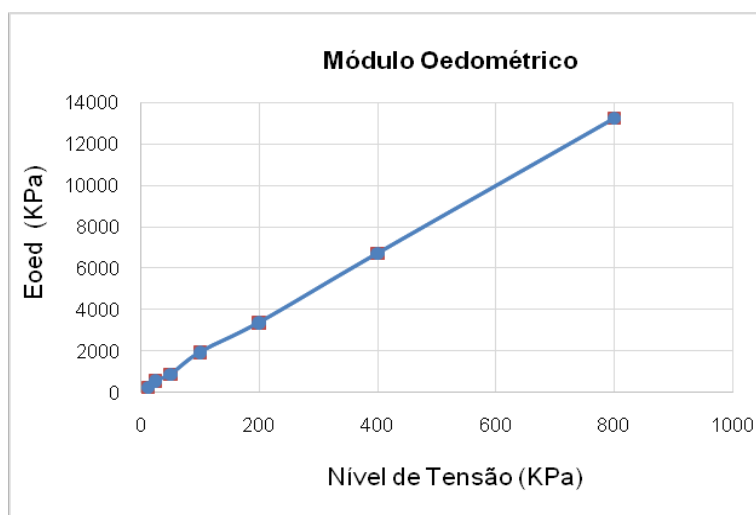
Fonte: Autora (2022)

É possível observar, a partir das curvas de adensamento apresentadas nos Gráficos 3 e 4 que os índices de adensamento/compressão e expansão dos solos se apresentaram baixos tanto para a berma ($C_c = 0,164$; $C_s = 0,013$) como para o talude ($C_c = 0,212$; $C_s = 0,014$), o que já era esperado devido o material ensaiado ser predominantemente arenoso. Para Carvalho (2004) e Lira (2017) solos arenosos são mais compressíveis por não possuírem uma camada dupla que lubrifica o contato entre suas partículas, o que facilita o deslocamento relativo entre elas.

Os módulos de elasticidade oedométricos das amostras de solo retiradas da berma e talude foram estimados por equação numérica, Figuras 20 e 21.

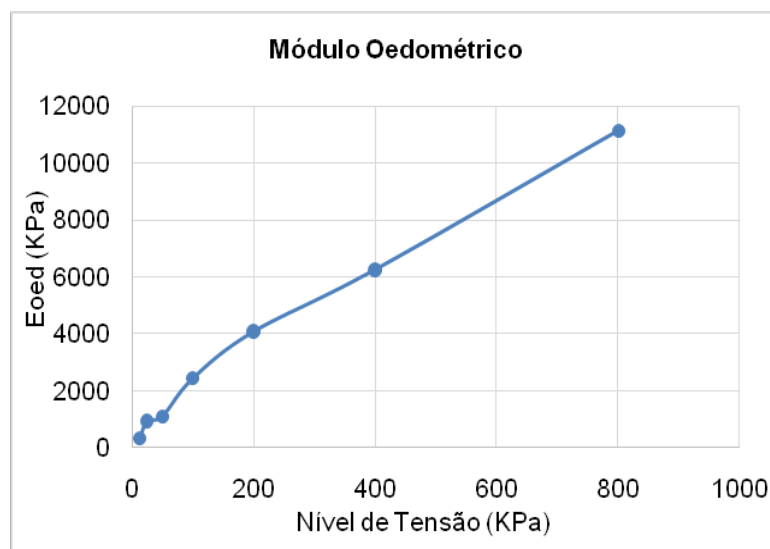
Conforme se observa nas seguintes Figuras 20 e 21 os Eoed's estimados apresentaram comportamentos semelhantes tanto para berma como talude, com aumentos lineares dos Eoed's para cada nível de tensão aplicado. Ambas as amostras de solo forneceram módulos de elasticidade entre 2.000 KPa e 13.000 KPa, valores típicos de solos arenosos, conforme Pinto (2006). Menegotto (2004) salientou que a aplicação dos resultados dos Eoed's devem ser referidos ao nível de tensões de interesse.

Figura 20 - Módulos oedométricos obtidos para a amostra de solo da berma



Fonte: Autora (2022)

Figura 21 - Módulos oedométricos obtidos para a amostra de solo do talude



Fonte: Autora (2022)

5.2.3 Ensaio com o Humbolt GeoGauge

Os ensaios realizados com o GeoGauge possibilitaram verificar o comportamento estatístico da variabilidade dos módulos de rigidez e elasticidade encontrados nas bermas que compõem a camada de cobertura final do ASMOC. Ao total foram 40 pontos ensaiados.

Os valores de tendência central e dispersão dos módulos de rigidez e de elasticidade das bermas estão apresentados na Tabela 8, na qual exibe o resultado da estatística descritiva dos resultados.

Tabela 8 - Análise estatística dos dados obtidos nas bermas pelo Humbolt GeoGauge

Parâmetros Estatísticos	Módulo	
	Rigidez (MN/m)	Elasticidade (MPa)
Média (μ)	10,2	88,2
Mediana (Md)	8,3	72,7
Variância (Var)	35,8	269,3
Desvio Padrão (DP)	5,9	51,8
Coefficiente de Variação (CVar)	58,7	58,8
Máximos (Max)	23,3	201
Mínimos (Min)	1,8	16,3

Fonte: Autora (2022)

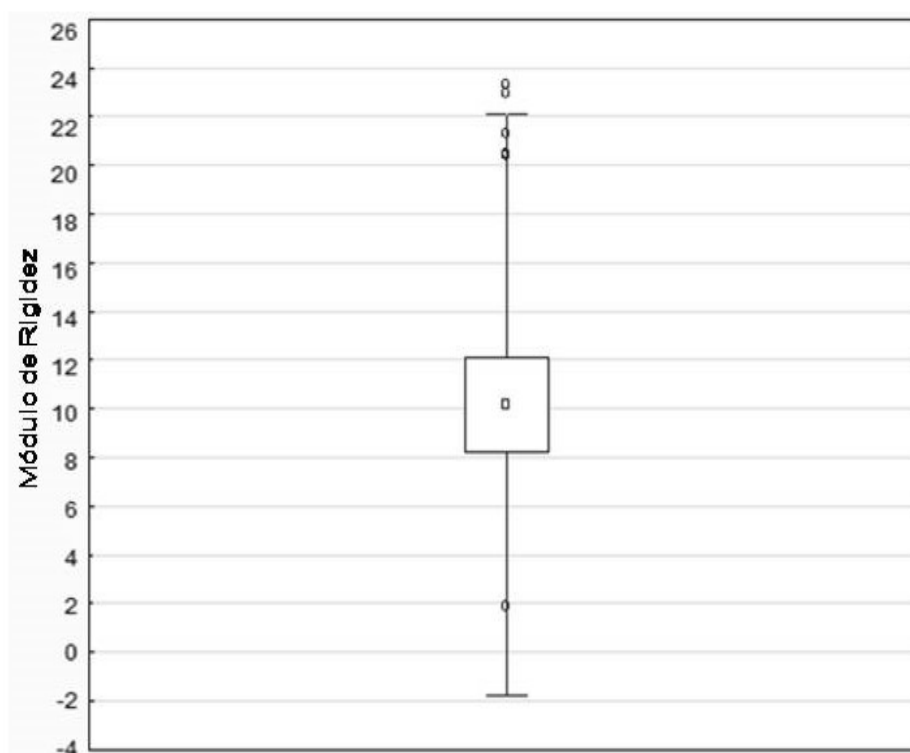
Dos resultados apresentados na Tabela 8, admite-se uma relação linear entre os módulos de rigidez e elasticidade determinados pelo GeoGauge. Considerado isto, esses valores representam uma faixa típica para os parâmetros obtidos nas bermas. Assim, verificou-se que os valores de tendência central (média e mediana) se apresentaram próximos (rigidez: $\mu=10,2$ MN/m e $Md=8,3$ MN/m; elasticidade: $\mu=88,2$ MPa e $Md= 72,7$ MPa), sugerindo que há simetria na distribuição dos módulos de rigidez e elasticidade analisados.

As medidas de dispersão representam a variabilidade do conjunto de dados de rigidez e elasticidade analisados. Assim, os resultados da variância nessa pesquisa para rigidez foi 35,8 MN/m enquanto para o módulo de elasticidade foi 269,33 MPa. Quanto ao desvio padrão, este se apresentou satisfatoriamente aceitável: 5,98 e 51,8 para rigidez e elasticidade, respectivamente, uma vez que não se apresentaram muito discrepantes quando comparados aos valores das médias obtidas para esses parâmetros. Diferentemente dos coeficientes de variação dos parâmetros estudados que se apresentaram praticamente iguais: 58,7 para rigidez e 58,8 para elasticidade, sugerindo semelhanças durante a metodologia de obtenção das medidas de dispersão do conjunto de dados dos parâmetros estudados.

Ainda conforme a Tabela 8, os resultados de amplitude total se apresentaram com diferenças significativas: 21,5 e 184,7 para a rigidez e elasticidade, respectivamente. Esses valores são admissíveis, tendo em vista que a execução das bermas se deu em diferentes momentos durante a construção do aterro. Importante citar que a amplitude total é uma medida simples de variabilidade, pois depende apenas da diferença entre o valor máximo e o valor mínimo do conjunto de dados estudados, conforme Reis e Reis (2002).

Para verificar graficamente a dispersão dos valores encontrados para os módulos de rigidez e elasticidade, bem como a ocorrência de valores discrepantes (outliers), foram formulados gráficos do tipo bloxplot. Os Gráficos 5 e 6 representam o comportamento das bermas quanto à dispersão dos valores dos módulos de rigidez e elasticidade, respectivamente.

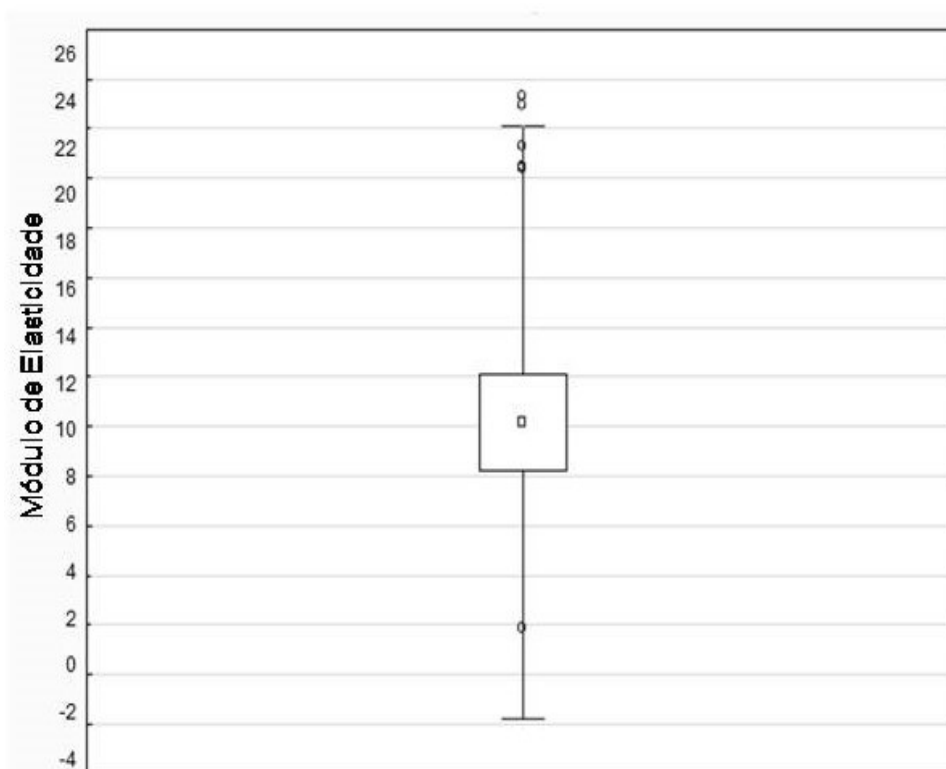
Gráfico 5 - Boxplot dos módulos de rigidez das bermas



Fonte: Autora (2022)

Constatou-se no Gráfico 5 uma simetria superior representando uma maior concentração entre os quartis Q2 e Q3. Obteve-se uma média de 10,2 MPa com relação à frequência dos módulos de rigidez, sendo que a maior parte dos valores tiveram frequência na faixa entre 8 e 12 MPa. Observou-se também alguns valores tão abaixo da frequência como 0,0 MPa e tão elevados como 22,1MPa. O boxplot do Gráfico 5 apresentou dois outliers quando da análise do conjunto de dados dos módulos de rigidez, sendo eles: 2 e 24,5 MPa, esses valores se apresentaram muito discrepantes quando comparados à média e aos demais valores do conjunto de dados.

Gráfico 6 - Boxplot dos módulos de elasticidade das bermas



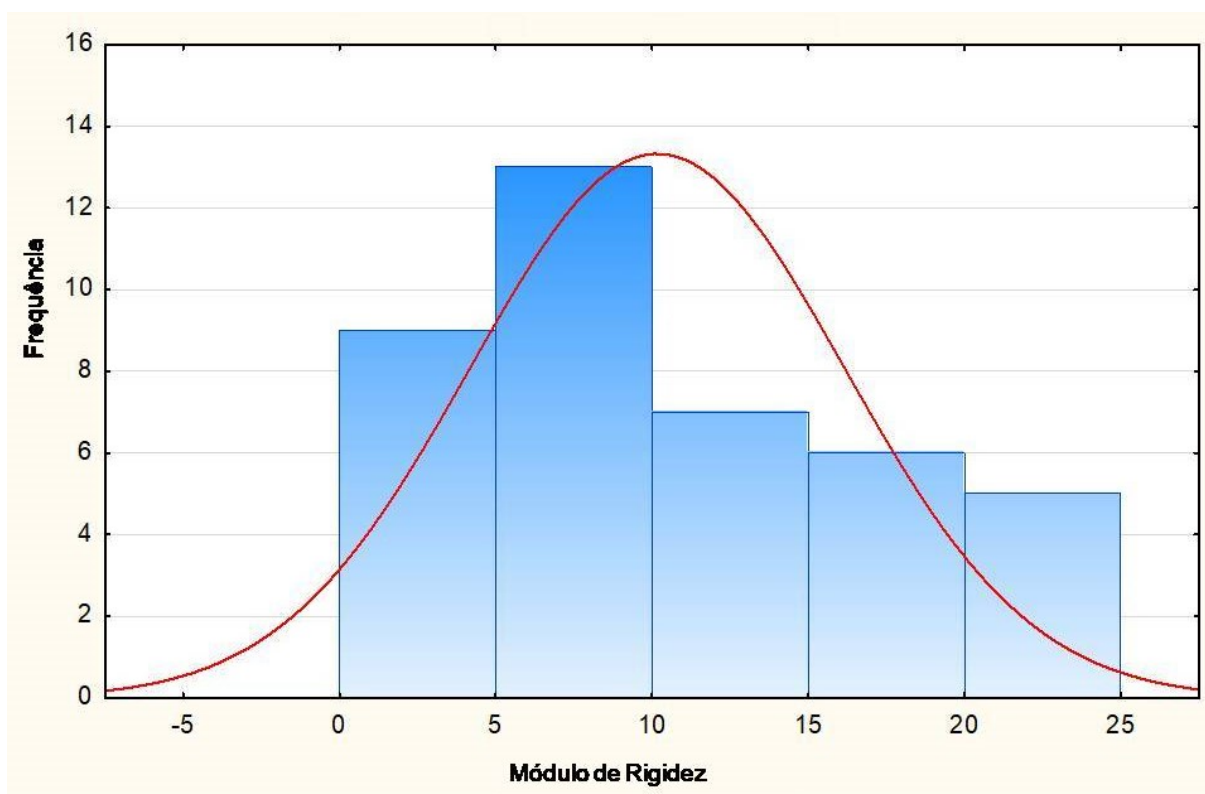
Fonte: Autora (2022)

Quanto à dispersão dos módulos de elasticidade observou-se também uma simetria superior representando uma maior concentração entre os quartis Q2 e Q3, conforme Gráfico 6. Obteve-se uma média de 88,2 MPa com relação à frequência dos módulos de elasticidade, sendo que a maioria dos valores tiveram

freqüência na faixa entre 71,5 e 104,7 MPa. Observou-se também alguns valores tão abaixo da freqüência como 0 MPa e tão elevados como 191,9MPa. O boxplot do Gráfico 6 apresentou dois outliers quando da análise do conjunto de dados dos módulos de elasticidade, sendo eles: 18 e 200,2MPa, esses valores se apresentaram muito discrepantes quando comparados à média e aos demais valores do conjunto de dados.

Os histogramas dos módulos de rigidez e elasticidade das bermas que compõem a camada de cobertura final do ASMOC são apresentados a seguir. A Figura 22 mostra o histograma do comportamento das bermas quanto à rigidez. Já a Figura 23 mostra quanto à elasticidade.

Figura 22 - Histograma dos módulos de rigidez das bermas

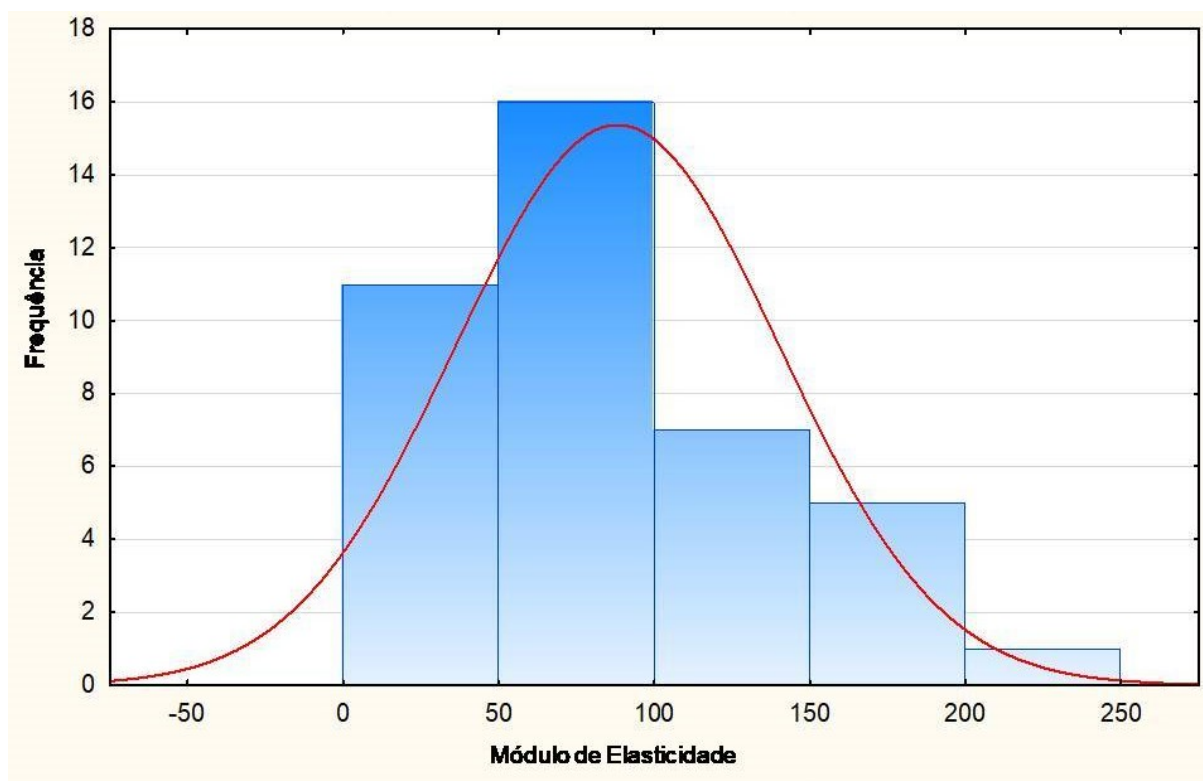


Fonte: Autora (2022)

Conforme se observa na Figura 22 a classe que apresentou a maior freqüência foi a do intervalo de rigidez entre 5 e 10 NM/m^2 , enquanto a de menor freqüência foi a classe compreendida entre 20 a 25 Nm/m^2 . Todos esses valores

foram considerados dentro da média, portanto, aceitáveis.

Figura 23 - Histograma dos módulos de elasticidade das bermas



Fonte: Autora (2022)

Conforme se observa na Figura 23 a classe que apresentou a maior frequência foi a do intervalo de rigidez compreendida entre 50 e 100 NM/m^2 , enquanto a de menor frequência foi a classe compreendida entre 200 a 250 Nm/m^2 . Todos esses valores foram considerados dentro da média, portanto, aceitáveis.

A Tabela 9 traz o comportamento estatístico da variabilidade dos módulos de rigidez e elasticidade encontrados nos taludes que compõem a camada de cobertura final do ASMOC. Ao total foram 40 pontos ensaiados.

Os valores de tendência central e dispersão dos módulos de rigidez e de elasticidade dos taludes estão apresentados na Tabela 9, na qual exibe o resultado da estatística descritiva dos resultados.

Tabela 9 - Análise estatística dos dados obtidos nos taludes pelo Humbolt GeoGauge

Parâmetros Estatísticos	Módulo	
	Rigidez (NM/m)	Elasticidade (MPa)
Média (μ)	5,1	44,1
Mediana (Md)	4,3	36,7
Variância (Var)	7,3	540,3
Desvio Padrão (DP)	2,7	23,3
Coefficiente de Variação (CVar)	52,8	52,7
Máximos (Max)	15,1	131,1
Mínimos (Min)	1,5	13,4

Fonte: Autora (2022)

Dos resultados apresentados na Tabela 9, admite-se uma relação linear entre os módulos de rigidez e elasticidade determinados pelo GeoGauge. Considerado isto, esses valores representam uma faixa típica para os parâmetros obtidos nos taludes. Assim, verificou-se que os valores de tendência central (média e mediana) se apresentaram próximos (rigidez: $\mu=5,1$ e $Md=4,3$; elasticidade: $\mu=44,1$ e $Md=36,7$), sugerindo que há simetria na distribuição dos módulos de rigidez e elasticidade analisados.

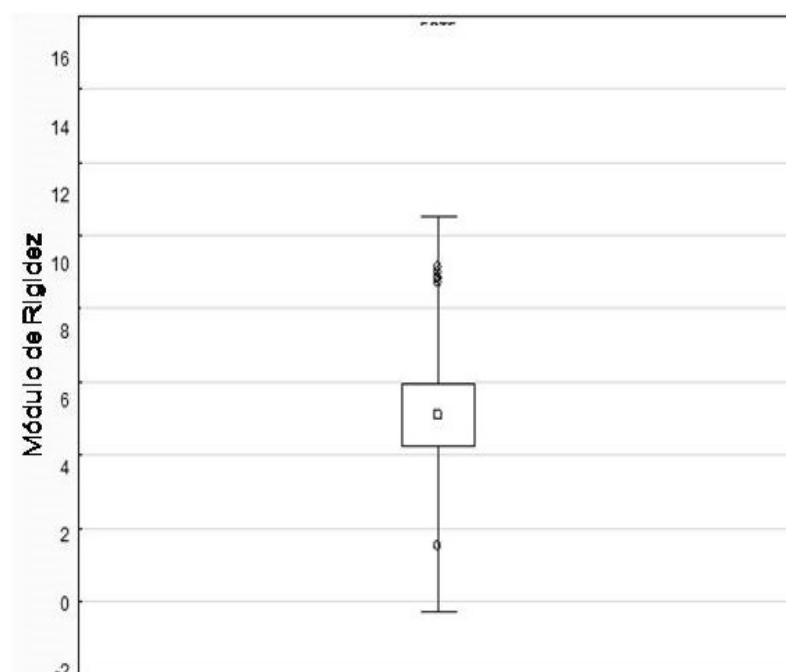
As medidas de dispersão representam a variabilidade do conjunto de dados de rigidez e elasticidade analisados. Assim, os resultados da variância nessa pesquisa para rigidez foi 7,3 enquanto para o módulo de elasticidade foi 540,3. Quanto ao desvio padrão, este se apresentou satisfatoriamente aceitável: 2,7 e 23,3 para rigidez e elasticidade, respectivamente, uma vez que não se apresentaram discrepantes quando comparados aos valores das médias obtidas para esses parâmetros. Diferentemente dos coeficientes de variação dos parâmetros estudados que se apresentaram praticamente iguais: 52,8 para rigidez e 52,7 para elasticidade, sugerindo semelhanças durante a metodologia de obtenção da variabilidade dos parâmetros estudados.

Ainda conforme a Tabela 9, os resultados de amplitude total se

apresentaram com diferenças significativas: 13,6 e 117,7 para a rigidez e elasticidade, respectivamente. Esses valores são admissíveis, tendo em vista que a execução dos taludes se deu em diferentes momentos durante a construção do aterro.

Para verificar graficamente a dispersão dos valores encontrados para os módulos de rigidez e elasticidade, bem como a ocorrência de valores discrepantes (outliers), foram formulados gráficos do tipo bloxplot. Os Gráficos 7 e 8 representam o comportamento da dispersão dos valores dos módulos de rigidez e elasticidade, obtidos nos taludes.

Gráfico 7 - Boxplot dos módulos de rigidez dos taludes

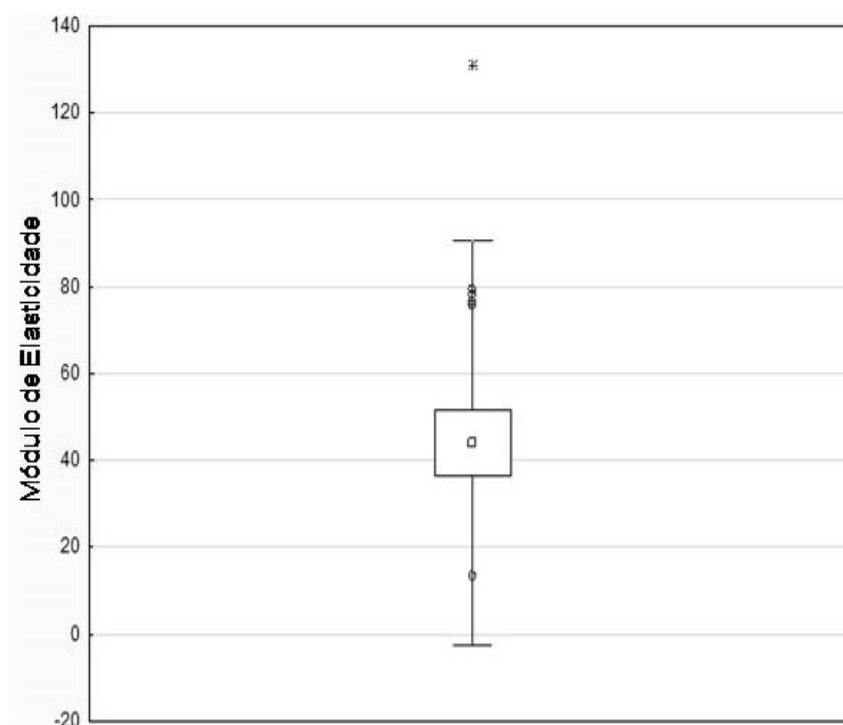


Fonte: Autora (2022)

Constatou-se no Gráfico 7 uma simetria superior representando uma maior concentração entre os quartis Q2 e Q3. Obteve-se uma média de 5,1 MPa com relação à frequência dos módulos de rigidez, sendo que a maior parte dos valores tiveram frequência na faixa entre 4 e 6 MPa. Observou-se também alguns valores tão abaixo da frequência como 0,0 MPa e tão elevados como 10,5 MPa. O boxplot do Gráfico 7 apresentou outliers quando da análise do conjunto de dados

dos módulos de rigidez, sendo eles: 2,2 e 8,5MPa, esses valores se apresentaram levemente discrepantes quando comparados à média e aos demais valores, diferentemente do comportamento das bermas que apresentaram outliers discrepantes.

Figura 8 - Boxplot dos módulos de elasticidade dos taludes

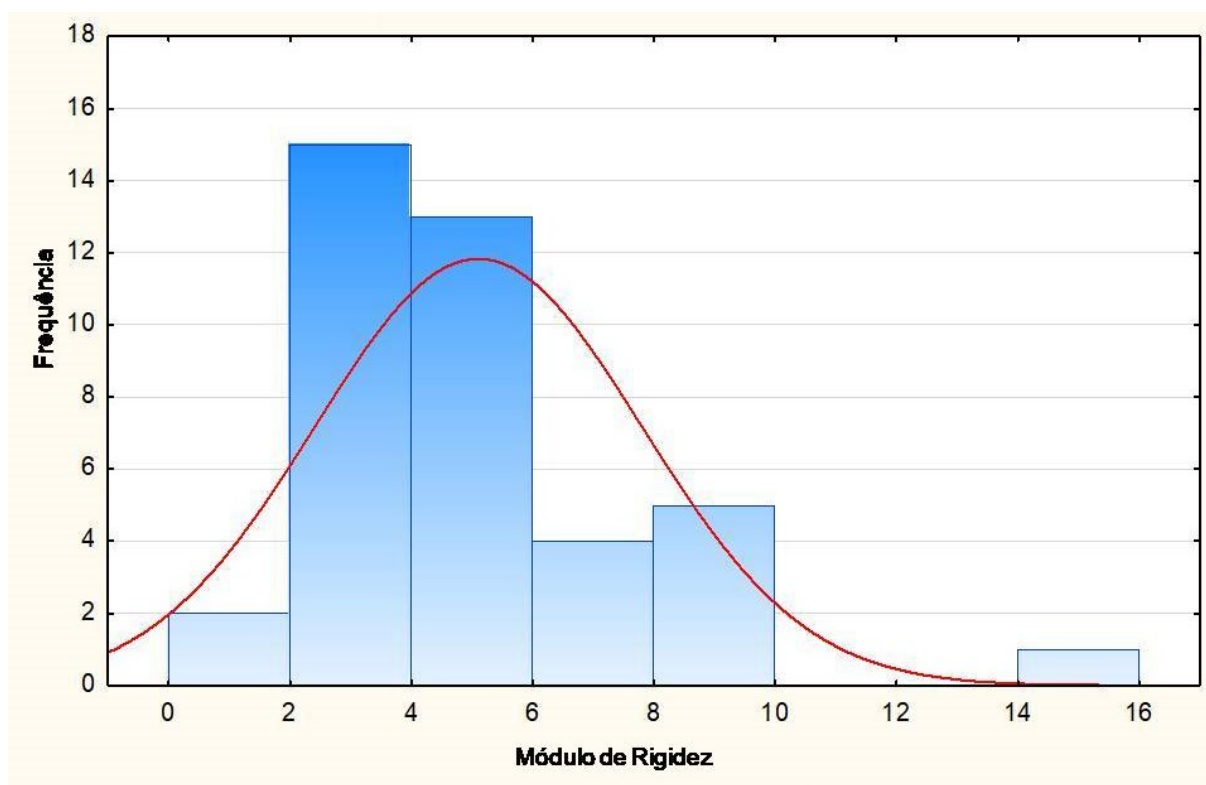


Fonte: Autora (2022)

Quanto à dispersão dos módulos de elasticidade observou-se também uma simetria superior representando uma maior concentração entre os quartis Q2 e Q3, conforme o Gráfico 8. Obteve-se uma média de 44,1 MPa com relação à frequência dos módulos de rigidez, sendo que a maioria dos valores tiveram frequência na faixa entre 36,6 e 51,5 MPa. Observou-se também alguns valores tão abaixo da frequência como 0 MPa e tão elevados como 90,5 MPa. O boxplot do Gráfico 8 apresentou dois outliers quando da análise do conjunto de dados dos módulos de rigidez, sendo eles: 18 e 200,2 MPa, esses valores se apresentaram muito discrepantes quando comparados à média e aos demais valores do conjunto de dados.

Os histogramas dos módulos de rigidez e elasticidade dos taludes que compõem a camada de cobertura final do ASMOC são apresentados a seguir. A Figura 24 mostra o histograma do comportamento dos taludes quanto à rigidez. Já a Figura 25 mostra quanto à elasticidade.

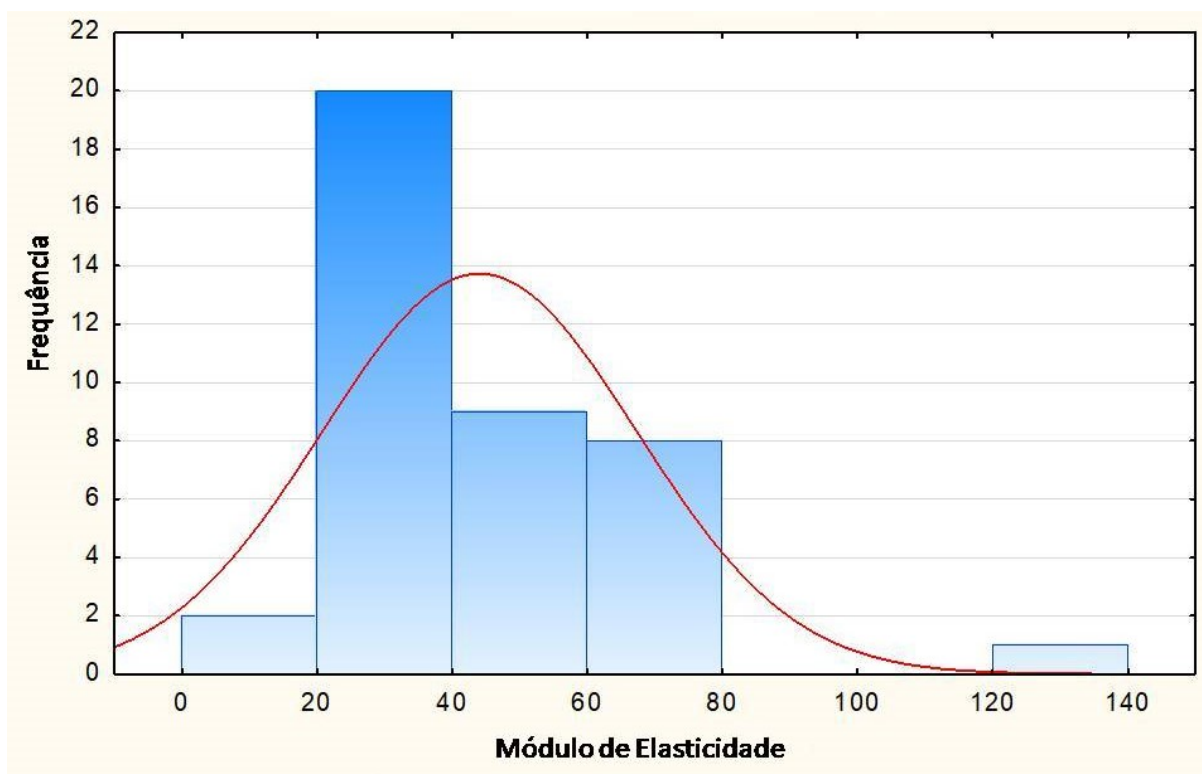
Figura 24 - Histograma dos módulos de rigidez dos taludes



Fonte: Autora (2022)

Conforme se observa na Figura 24 a classe que apresentou a maior frequência foi a do intervalo de rigidez compreendida entre 2 e 4 NM/m^2 , enquanto a de menor frequência foi a classe compreendida entre 14 e 16 Nm/m^2 . Esses valores foram considerados dentro da média, portanto, aceitáveis.

Figura 25 - Histograma dos módulos de elasticidade dos taludes



Fonte: Autora (2022)

Conforme se observa na Figura 25 a classe que apresentou a maior frequência foi a do intervalo de rigidez compreendida entre 20 e 40 MPa enquanto a de menor frequência foi a classe compreendida entre 120 a 140 MPa. Todos esses valores foram considerados, portanto, aceitáveis.

Nessa pesquisa, os resultados dos módulos de rigidez e elasticidade encontrados no solo compactado da cobertura final do ASMOC podem ser comparados a parâmetros de solos colapsíveis (BORGES, FREITAS, FERREIRA *et al.*, 2017), camadas de subleitos de pavimentos (RODRIGUES, 2006; RÉUS, SILVA JUNIOR, FONTENELE, 2014; LIMA *et al.*, 2015), solos de fundação rasas (PANTELDIS, 2019) e outros.

Devido às vantagens de utilização do equipamento GeoGauge diversos autores correlacionaram os módulos de rigidez e elasticidade obtidos por ele aos parâmetros obtidos com outros métodos considerados complexos e dispendiosos.

Batista (2007) utilizou os resultados obtidos com o GeoGauge em comparativo aos parâmetros alcançados com os ensaios de penetrômetro PANDA,

Viga Benkelman e o pressiômetro PENCEL. Para o autor, a comparação foi satisfatória em relação aos parâmetros de elasticidade.

Hossain e Apeageyi (2010) compararam os resultados dos ensaios com equipamentos de Deflectômetro de Peso Leve (LWD) e o Cone de Penetração Dinâmica (DCP) com os do GeoGauge. Os autores concluíram que as correlações não foram significativas e que o efeito do teor de umidade se sobrepõe ao da densidade quando se considera a medição da rigidez pelos dispositivos ensaiados.

Lenke, Gordon Mckenn e Grush (2003) apontaram o GeoGauge como um método não nuclear de controle de compactação. Para os autores o equipamento mede satisfatoriamente os módulos de rigidez das camadas de solos granulares.

Seyman (2003) correlacionou os resultados obtidos com o Geogauge, Deflectômetro de Impacto Leve (LFWD) e Cone de Penetração Dinâmica (DCP) com o Teste de Placa de Carga (PLT) e Índice de Suporte Califórnia (CBR). Para o autor, ocorreu boa correlação entre o Geogauge e o (DCP) com o CBR.

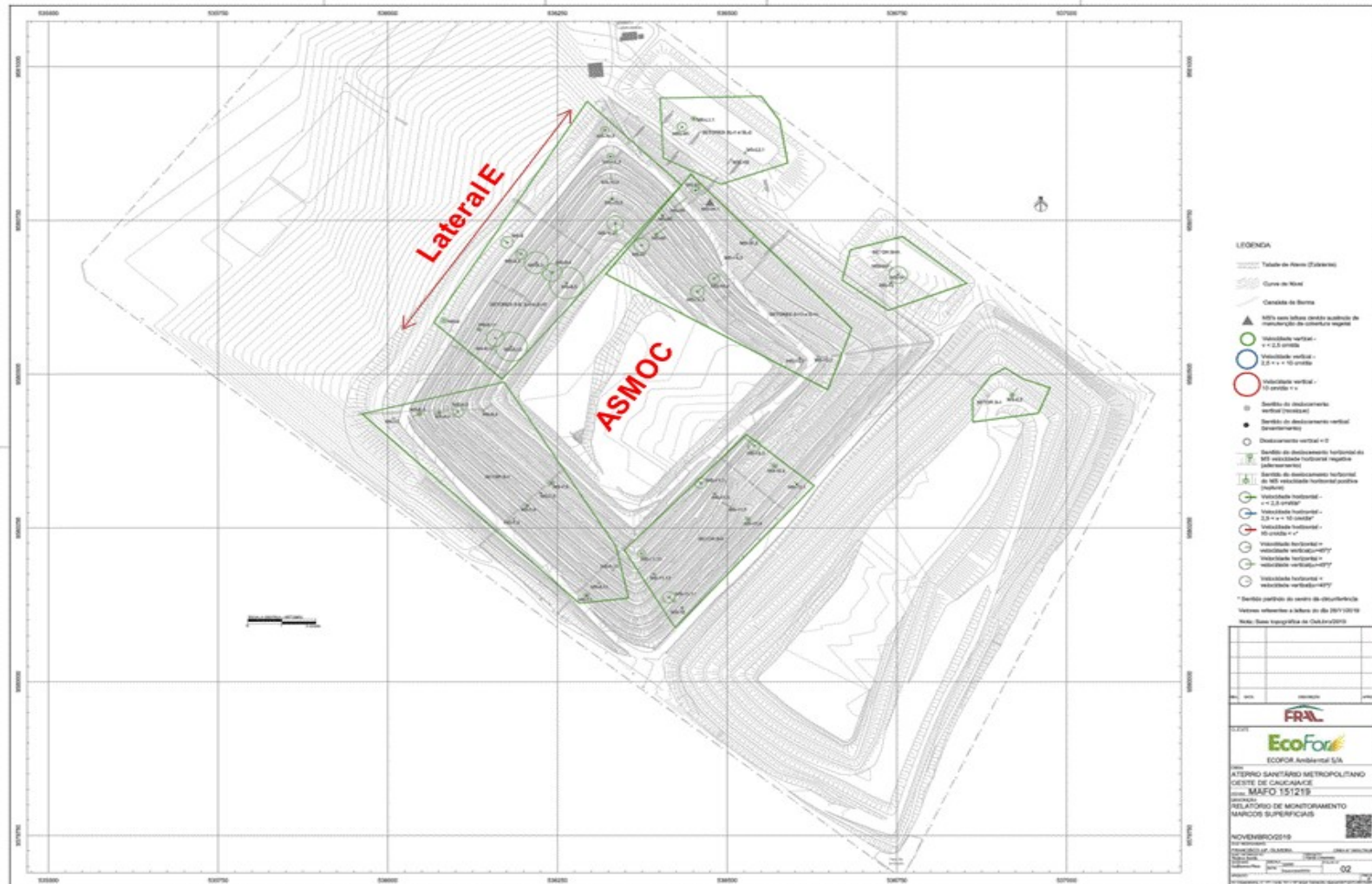
Dwivedi e Suman (2019) realizaram uma análise de regressão da correlação entre os módulos de rigidez e elasticidade *in situ* obtidos pelo GeoGauge e LWD. Os autores encontraram significativa correlação entre os parâmetros, sugerindo sua aplicação na avaliação qualitativa de acostamentos de rodovias.

Ewing *et al.* (2021) obtiveram resultados de rigidez do solo por meio de sensoricamente remoto térmico com posterior comparação aos valores de rigidez obtidos com o GeoGauge. Para os autores tal correlação é possível, no entanto ainda há necessidade de adicionar informações referentes às características do solo.

5.3 Análise da Movimentação do histórico de Leitura dos Marcos Superficiais instalados no ASMOC

A Lateral E é composta pelos setores 8, 9 e 10. Ao total são 45 marcos superficiais instalados nos maciços do ASMOC, sendo que 13 estão localizados na Lateral E (Figura 26). A análise do histórico de movimentação dos MS's tem por objetivo prever e garantir a integridade global do aterro sanitário.

Figura 26 - Localização dos MS's instalados na Lateral E, na área de pesquisa



Fonte: Relatório de monitoramento geotécnico do ASMOC, adaptado pela autora (2020)

A análise da movimentação dos MS's é realizada quanto às seguintes situações: sentidos da velocidade de deslocamento horizontal e vertical, velocidades horizontal e vertical e ângulos de velocidade de deslocamento.

Quanto ao sentido da velocidade de deslocamento horizontal os marcos superficiais MS-8.11, MS-8.12, MS-9, MS-10.2, MS-10.3 e MS-10.6 apresentaram movimentação no sentido de adensamento dos resíduos e da camada de cobertura final. Já a movimentação dos marcos MS-8, MS-8.13, MS-9.2, MS-9.3, MS-9.4, MS-9.5, MS-10.4 e MS-10.5 indicou uma movimentação no sentido de ruptura e escorregamento dos resíduos e da camada de cobertura final.

No que diz respeito ao sentido da velocidade de deslocamento vertical, os marcos MS-10.2, MS-10.3, MS-10.5 se apresentaram com velocidade vertical negativa, indicando uma movimentação de expansão/levantamento dos resíduos e da camada de cobertura final. Enquanto os marcos MS-8, MS-8.11, MS-8.12, MS-8.13, MS-9, MS-9.2, MS-9.3, MS-9.4, MS-9.5, MS-10.6 apresentaram velocidade vertical positiva, ou seja, se comportaram com movimentos de adensamento/recalque dos resíduos e da camada de cobertura final. O MS-10.4 não apresentou velocidade de deslocamento vertical.

Ao total dos 14 MS's instalados na lateral E, todos atingiram velocidade de deslocamento tanto vertical como horizontal abaixo de 2,5 (cm/dia), exceto o MS-10.4 que não apresentou nenhum tipo de deslocamento. A velocidade 2,5 (cm/dia) é considerada como limite aceitável para operação do ASMOC.

Os marcos MS-9, MS-9.3, MS-9.5 e MS-10.2 se mantiveram com ângulo de velocidade de deslocamento horizontal menor que a de deslocamento vertical ($\alpha < 45^\circ$), indicando uma tendência de adensamento dos resíduos e da camada de cobertura final. Enquanto os marcos MS-8, MS-8.11, MS-8.12, MS-9.2, MS-9.4, MS-10.3, MS-10.4 e MS-10.5, apresentaram velocidade de deslocamento horizontal igual a de deslocamento vertical ($\alpha = 45^\circ$). Já os MS-8.13 e MS-10.6 apresentaram velocidade de deslocamento horizontal maior que a de deslocamento vertical ($\alpha > 45^\circ$) indicando um cenário de tendência ao aparecimento de fissuras e trincas na camada de cobertura final.

Em linhas gerais, a movimentação dos MS's apresentou deslocamentos em diferentes sentidos e direções, conforme a Tabela 10.

Tabela 10 - Movimentação dos MS's instalados na Lateral E da área pesquisada

Marcos Superficiais	Tipo de Deslocamento	Tipo de Movimentação
MS-8.11, MS-8.12, MS-9, MS-10.2, MS-10.3 e MS-10.6	Velocidade de deslocamento horizontal	Adensamento dos resíduos e da camada de cobertura final
MS-8, MS-8.13, MS-9.2, MS-9.3, MS-9.4, MS-9.5, MS-10.4 e MS-10.5		Ruptura e escorregamento dos resíduos e da camada de cobertura final.
MS-10.2, MS-10.3, MS-10.5	Velocidade de deslocamento vertical	Negativa - Expansão/levantamento dos resíduos e da camada de cobertura final
MS-8, MS-8.11, MS-8.12, MS-8.13, MS-9, MS-9.2, MS-9.3, MS-9.4, MS-9.5, MS-10.6=10		Positiva - Adensamento/recalque dos resíduos e da camada de cobertura final
MS-9, MS-9.3, MS-9.5 e MS-10.2=4	Ângulo de velocidade de deslocamento horizontal menor que a de deslocamento vertical ($\alpha < 45^\circ$)	Adensamento dos resíduos e da camada de cobertura final
MS-8, MS-8.11, MS-8.12, MS-9.2, MS-9.4, MS-10.3, MS-10.4 e MS-10.5=8	Velocidade de deslocamento horizontal igual a de deslocamento vertical ($\alpha = 45^\circ$)	Estático
MS-8.13 e MS-10.6=2	Velocidade de deslocamento horizontal maior que a vertical ($\alpha > 45^\circ$)	Indicando um cenário de tendência ao aparecimento de fissuras e trincas na camada de cobertura final.

Fonte: Autora (2022)

Os marcos superficiais ganharam notoriedade pelo fato de possibilitar prever a tipologia do potencial movimento do maciço. Assim, o resultado da análise realizada nos MS's do instalado no ASMOC indica que o maciço se encontra no processo de acomodação desigual, o que justifica os diferentes sentidos, ângulos e velocidades de deslocamentos dos MS's. Assim, os movimentos que predominaram na Lateral E do ASMOC foram os de ruptura/escorregamento e adensamento/recalque do maciço e da camada de cobertura final. Sabe-se que recalques pontuais acentuados são uma das principais causas de rompimentos em aterros. Para Sarihan e Stark (2008), as rupturas ocorrem (em sua maioria) próximas ao topo do aterro, se estendendo posteriormente para o interior do maciço.

A acomodação desigual detectada no ASMOC é resultado, provavelmente, da heterogeneidade dos resíduos aterrados que por conseguinte passam diferentes estágios de biodegradação. Conforme Mamede (2014) o diagnóstico de identificação de eventos iniciadores de acidentes geotécnicos em aterros é um suporte de apoio importante para facilitar a análise do risco ambiental da atividade.

A instrumentação de aterros, a exemplo da instalação de marcos superficiais, é parte primordial dos planos de instrumentação e monitoramento. Na visão de Benvenuto *et al.* (2019) o objetivo desses planos é permitir aos especialistas e empreendedores elaborarem um seguro prognóstico de estabilidade geotécnica dos maciços, subsidiando os planos de emergências e contingências que exibem, demonstram e minimizam eventuais problemas futuros.

6 CONCLUSÕES

A combinação de diferentes aspectos monitorados em um aterro sanitário encerrado certamente guiará a melhor opção de reuso para as condições reais nas quais o equipamento foi construído. Sob esse cenário, a presente pesquisa perpassou por ensaios geotécnicos *in situ* e em laboratório e análise de marcos superficiais instalados na área de estudo, com as seguintes conclusões:

- O monitoramento geotécnico realizado na cobertura final do aterro sanitário estudado permitiu indicar alguns aspectos a serem observados durante a execução e pós-encerramento desses sistemas, a exemplo dos tipos de solos a serem utilizados.
- O conjunto de ensaios aplicados ao solo da cobertura final do ASMOC foi assertiva, pois possibilitou obter parâmetros de solos aplicados em camadas de coberturas finais muito comuns entre os aterros brasileiros.
- A adequação textural do solo da cobertura final do ASMOC é uma intervenção que deve ser observado pelo corpo técnico operacional do ASMOC, conforme diretrizes recomendadas pela USEPA e CETESB.
- O fato do solo de cobertura do ASMOC ser predominantemente areia silto-argilosa, não impossibilitou que o solo apresentasse um eficiente comportamento quanto à compactação, uma vez que obteve-se significativos valores de massas específicas obtidos tanto pelo método de compactação proctor normal (laboratório) como pelo de frasco de areia (*in situ*).
- Os índices de compressão e expansão do solo da cobertura final do ASMOC podem ser aplicados, futuramente, como parte integrante de um possível projeto de alteamento/verticalização do ASMOC, uma vez que as coberturas finais não são projetadas para sofrerem sobrecargas. Sendo assim, esses valores podem ser aplicados para um eficiente dimensionamento (altura e material a ser utilizado) desses novos sistemas de modo que não sejam afetados pelos recalques.
- O monitoramento da movimentação de marcos superficiais certamente é uma eficiente ferramenta para previsibilidade de recalques. A precisão nas leituras depende de uma assertiva instalação dos marcos, além de um período longo e constante de leituras.
- A análise da movimentação dos MS's instalados no ASMOC indicou que o maciço está em reconformação, uma vez que apresentou deslocamentos em diferentes sentidos e direções. Isso se dar provavelmente pelo processo de extração do biogás realizado no

ASMOC, no qual utiliza pressão negativa, o que acaba por acelerar os processos de recalques.

- O fato do maciço se movimentar a uma velocidade abaixo de 2,5 (cm/dia), demonstra que o maciço se encontra estável geotécnica e mecanicamente quanto á sua estrutura global, uma vez que está suportando a reconformação do maciço.
- As estimativas dos módulos de elasticidade obtidos pelos ensaios de adensamento se apresentaram maiores no solo amostrado da berma, com valores atingindo módulos de até 13.000 KPa.
- As estimativas dos módulos de elasticidade obtidos pelos ensaios de compressão triaxial e adensamento apresentaram comportamentos semelhantes, ou seja, os valores dos módulos tenderam ao crescimento conforme a aplicação das tensões. Esse comportamento é típico de solos arenosos.
- Os módulos de elasticidade estimados pelo Humbolt GeoGauge são significativamente maiores quando comparados aos obtidos pelos ensaios de compressão triaxial e de adensamento. Isso se dar provavelmente pelo fato do GeoGauge impor níveis de tensões mais elevados em comparação aos níveis dos ensaios realizados no laboratório.
- Os maiores módulos de rigidez obtidos pelo equipamento Humbolt GeoGauge se concentraram nos pontos ensaiados nas bermas. Disso, entende-se que aparentemente as bermas respondem melhor ao processo de compactação.
- O GeoGauge se apresentou eficiente para obtenção da variabilidade dos módulos de rigidez e elasticidade do solo compactado da cobertura final do ASMOC.
- O princípio de funcionamento do GeoGauge prioriza o tempo de resposta da vibração emitida no solo ensaiado, portanto, quanto mais compacta a estrutura menor será esse tempo. Além disso, ele permite um detalhamento satisfatório acerca das características da estrutura compactada (módulo de rigidez) e do material aplicado (módulo de elasticidade). Esses aspectos reafirmam seu potencial de uso como

ferramenta para monitoramento geotécnico de aterros encerrados e em operação, principalmente sua aplicabilidade no controle *in situ* da compactação.

- O reuso de áreas que abrigam aterros sanitários encerrados é um desafio mundial e demanda estudos detalhados e dispendiosos, daí a importância de diversificar os métodos aplicados no monitoramento geotécnico e ambiental pós-encerramento de aterros sanitários, a exemplo da aplicação do Humbolt GeoGauge na presente pesquisa.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar, em maior quantidade, os ensaios de compressão triaxial e adensamento edométrico para fins comparativos com os resultados obtidos pelo GeoGauge quanto aos módulos de elasticidade do solo da cobertura final do ASMOC.
- Avaliar a aplicação do Geogauge durante a execução da camada de cobertura final como ferramenta de controle *in situ* da compactação.
- Utilizar a análise dos dados referentes à movimentação dos marcos superficiais como acréscimo ao cálculo de recalques de longo prazo do ASMOC.

REFERÊNCIAS

- AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES & DISEASE REGISTRY, ATSDR. **Landfill Gas Primer: An Overview for Environmental Health Professionals**. ATDRX: Division of Health Assessment and Consultation. 74p., 2001.
- AIVALIOTIS, V. *et al.* Functional relationships of landfill and landraise capacity with design and operation parameters. **Waste Management & Research**, [s./], v. 22, p. 283-290, 2004.
- ALBINO, U. da R. *et al.* Modelagem numérica da infiltração unidirecional em interfaces não saturadas solo-geotêxtil. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA, 13, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte, 2016.
- ALBRIGHT, W. H. *et al.* Field performance of a compacted clay landfill final cover at a humid site. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s./], v. 132, n. 11, p. 1393-1403, nov., 2006.
- ALCÂNTARA, P. B.; JUCÁ, J. F. T. Recalque em aterros: influência da composição dos resíduos sólidos urbanos, do clima e da biodegradação. **Geotecnia**, [s./], n. 18, p. 15-42, mar., 2010.
- ALCANTARA, P.B. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. 2007. 366 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.
- ALEYA, L. *et al.* Proposed changes for post-closure monitoring of etueffont landfill (France) form a 9-year survey. **Science of the Total Environment**, [s./], v. 656, p. 634-644, march, 2019.
- ALMEIDA, A. J. G. de 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 em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2017.
- ALMEIDA, F. T. R. *et al.* Caracterização física do solo utilizado em camadas de cobertura no aterro sanitário de Caucaia-Ceará. *In*: CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO, 5., Maceió. **Anais [...]**. Maceió, 2010.
- ALMEIDA, J. R. de; IZZO, R. L. dos S.; MAHLER, C. F. O uso de composto como alternativa de cobertura de aterros. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 7., SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, 6, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte, 2011.
- ALSHIBLI, K. A.; ABU-FARSAKH, M.; SEYMAN, E. Laboratory evaluation of the geogauge and light falling weight deflectometer as construction control tools. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s./], p. 560-569, 2005.

ALVES, A. K. **Proposta de manual técnico de medidas preventivas e corretivas para aterros sanitários encerrados**. 2010. 210 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM **D4767/2011**: Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils.

AMORIM, N. R. **Avaliação do desempenho de sistemas de cobertura na mina Rio Paracatu Mineração (RPM)**. 2008. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2008.

ANLAUF, R.; REICHEL, A. Effect of aging on the physical properties of landfill cover layers. **Eurasian Journal of soil science**, [s./], v. 3, p. 212-219, 2014.

ANTUNES, I. S. *et al.* 2018. Caracterização do solo e propriedades de fluxo da camada de cobertura de aterro sanitário de Campina Grande – PB. *In*: Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências, 3. Campina Grande, **Anais** [...]. Campina Grande, 2018.

ARAÚJO NETO, C. L de. **Análise do comportamento dos resíduos sólidos urbanos e desenvolvimento de modelos estatísticos para previsão das deformações de aterros sanitários**. 2016. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Pernambuco, 2016.

ARAÚJO, P da S. **Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

ARAÚJO, P da S. *et al.* Análise da viabilidade do uso de solo como material impermeabilizante em aterros sanitários. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS, 6, Campina Grande. **Anais** [...]. Campina Grande, 2016.

ASSIS, G. M de. *et al.* Módulo de elasticidade de solo arenoso compactado utilizando ensaios de ultrassom. *In*: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 32, Gramado. **Anais** [...]. Gramado, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 8.419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 13.896**: Aterros de Resíduos Não Perigosos - Critérios para Projeto, Implantação e Operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 15p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 16.853**: Amostra de solo: ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro: ABNT, p.11, 2020.
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 6457**: Amostra de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, p.8, 2016

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 16853**: Ensaio de adensamento unidimensional.. Rio de Janeiro, p. 5, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 6459**: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, p. 5, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 7180**: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, p. 3, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 7181**: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, p. 13, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 7182**: Compactação - Procedimento. Rio de Janeiro, p. 10, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 9813**: Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego de cilindro de cravação. Rio de Janeiro, p. 5, 2016.

ATHANASOPOULOS, G. *et al.* Municipal Solid Waste landfill failure. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING, 18th. Paris. **Proceedings** [...] Paris, 2010.

BABU, G. L. S.; REDDY, K. R.; SRIVASTAVA, A. Influence of spatially variable geotechnical properties of MSW on stability of landfill slopes. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, [s./], v. 18, n. 1, jan., 2014.

BABU, G. L. S.; SANTHOSH, L. G.; LAKSMIKANTHAN, P. Shear strength characteristics of mechanically biologically treated municipal solid waste (MBT-MSW) from Bangalore. **Waste Management**, [s./], v. 39, p. 63-70, may., 2015.

BAGCHI, A.; BHATTACHARYA, A. Post-closure care of engineered municipal solid waste landfills. **Waste Management & Research**, [s./], v. 33, n. 5, 2015.

BARNSWELL, D. K.; DWYER, D. F. Assessing the performace of evapotranspiration covers for municipal solid waste landfills in Northwestern Ohio, **Journal of Environmental Engineering**, [s./], v. 137, ed. 4, apr., 2011.

BARROS, L. H dos S. **Requalificação dos aterros desativados (brownfields) no município de São Paulo**: parques (Greenfields) Raposo Tavares e Jardim Primavera. 2011. 480 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

BARROSO, I. M. **Camadas de cobertura de aterro de resíduos sólidos: estudo preliminar de casos**. 2008. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

BATISTA, L. C. M. **Determinação de parâmetros de deformabilidade de camadas de um pavimento a partir de ensaios de campo**. 2007. 197 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

BATISTA, L. S. **Estudo de parâmetros geotécnicos e suas interações em uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos**. 2012. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

BELFORT, N. *et al.* Permeabilidade de um solo de comportamento anômalo utilizado para cobertura do aterro sanitário de Altinho/PE. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 9.*, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo, 2019.

BENSON, C. H.; DANIEL, D. E. The influence of clods on the hydraulic conductivity of a compacted clay. **Journal Geotechnical Engineering**, [s.l.], v. 116, n. 8, 1990.
BENTE, S. *et al.* Model for degradation-induced settlements as part of a coupled landfill model. **Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech**, [s.l.], p. 1391-1410, 2017.

BENVENUTO, C. *et al.* Instrumentação Geotécnica e Monitoramento da Estabilidade de Aterros Sanitários. **Revista Limpeza Pública**, [s.l.], v. 101, p. 21-31, 2019.

BERTELLI, C.; FALEIROS, T. de O.; SILVA, D. P. de A. C. Estudo socioeconômico do uso do eucalipto no encerramento de aterro sanitário. **Revista FACEF**, [s.l.], v. 16, n. 3, p. 328-342, set./out., 2013.

BIZARRETA, J. C. O.; de CAMPOS, T. M. P. Caracterização do lodo de uma estação de tratamento de chorume visando seu emprego em coberturas finais de aterros sanitários. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 7*, Belo Horizonte. **Anais** [...]. Belo Horizonte, 2011.

BOHN, S. *et al.* Improving the aeration of critical fine-grained landfill top cover material by vegetation to increase the microbial methane oxidation efficiency. **Waste Management**, [s.l.], v. 31, ed. 5, p. 854-863, may., 2011.

BORGATTO, A. V. A. **Estudo do efeito fibra e da morfologia na estabilidade de aterros de resíduos sólidos urbanos**. 2006. 174 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

BORGES, J. J. S.; FREITAS, M. L. R. A; FERREIRA, S. R. M. Variação do módulo de elasticidade de um solo Colapsível de Petrolina/PE com e sem inundação. **Revista Matéria**, [s.l.], v. 22, 2017.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 248p, 2008.

BRASIL. **Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de

Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.

BRASIL. **Lei 11.107 de 06 de abril de 2005**. Dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos e dá outras providências.

BROICHSITTER, S. B.; GERKE, H.; HORN, R. Suitability of Boudier Marl and Marsh Clay as sealing substrates for landfill capping systems – a practical comparison. **Geosciences**, [s.l.], v. 8, n. 10, p. 356, 2018.

BYUN, B. *et al.* Stability of bioreactor landfills with leachate injection configuration and landfill material condition. **Computers and Geotechnics**, [s.l.], v. 108, n. 2, p. 234-243, 2019.

CALLEGARO, M. S.; SANTOS, T. A dos.; PINHEIRO, R. J. B. Determinação das propriedades hidráulicas de um solo não saturado utilizado na camada de cobertura do aterro sanitário de Santa Maria/RS. *In*: SIMPÓSIO DE PRÁTICAS DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA REGIÃO SUL, 12, Santa Catarina. **Anais** [...]. Santa Catarina, 2019.

CAMARGO, K. R. **Avaliação da condutividade hidráulica e da resistência ao cisalhamento de misturas solo-bentonita**: estudo de caso de um aterro sanitário localizado em Rio Grande (RS). 2012. 111 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de São Carlos, São Carlos, 2012.

CAMPOS, J de O.; BRAGA, R. **Gestão de resíduos**: valorização e participação. Rio Claro: Laboratório de Planejamento Municipal, p. 117, 2005.

CARIBÉ, R. de M. **Análise multivariada no comportamento dos recalques em célula experimental de resíduos sólidos urbanos**. 2015. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2015.

CARNEIRO, A de A. **Estudo de capacidade de carga de uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos com bases em ensaios de laboratório e campo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

CARVALHO, J. B. Q de. **Fundamentos da mecânica dos solos**. 2ª ed. Campina Grande: Marcone, p. 310, 2004.

CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um aterro sanitário experimental**: avaliação da influência do projeto, construção e operação. 2008. 337 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F.; BATISTA, H. P. Análise da implantação da cobertura final do aterro sanitário de Belo Horizonte. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 26, Porto Alegre. **Anais** [...]. Porto

Alegre, 2011.

CHAN, C. On the interpretation of shear wave velocity from bender element tests. **Acta Technica Corviniensis Bulletin of Engineering**, [s.l.], v. 136, n. 1, p. 178-188, 2012.

CHARLES, W. W. Ng. *et al.* Physical and numerical modeling of an inclined three-layer (silt/gravelly sand/Clay) capillary barrier cover system under extreme rainfall. **Waste Management**, [s.l.], v. 38, p. 210-221, apr., 2015.

CHEN, Y. M.; ZHAN, L. T. Environmental geotechnics related to landfills of municipal solid wastes, **Springer**, [s.l.], p. 8-10, 2010 .

CHUN, S. K. Mass balance analysis on the behavior of major elements disposed at a waste landfill site. **Waste management**, [s.l.], v. 71, p. 233-243, 2018.

CLAYTON, C. R. I. Stiffness at small strain: research and practice. **Géotechnique**, [s.l.], v. 61, n. 1, p. 5-37, 2011.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, CETESB. **Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo**. 1993. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/qualidade-ar/wp-content/uploads/sites/28/2013/12/1993.pdf>. Acesso em: 18 jun., 2022.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM - CEMPRE. **Lixo municipal**: manual de gerenciamento integrado. São Paulo: CEMPRE, 4. ed., 316 p., 2018.

CONDE, M. C.; CALDEIRA, L.; LOPES, M. G. Estudo das condições de aplicação do GeoGauge e do deflectômetro de impacto portátil no controle da compactação. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 12, Guimarães. **Anais [...]**. Guimarães, 2010.

CONDE, T.T.; STACHIW, R.; FERREIRA, E. Aterro Sanitário como Alternativa para Preservação Ambiental. **Revista Brasileira de Ciências da Amazônia**, [s.l.], v. 3, n. 1, p. 69-80, 2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, CONAMA. **Resolução N° 404, de 11 de novembro de 2008**. Estabelece critérios e diretrizes para o licenciamento ambiental de aterro sanitário de pequeno porte de resíduos sólidos urbanos.

CONTE, M.; CARRUBBA, P. Geotechnical implications in the construction of landfills, **Revista Italiana de Geotecnica**, [s.l.], v. 47, n. 1, p. 32-41, 2013.

CORREIRA, A. G. Características de deformabilidade dos solos que interessam à funcionalidade das estruturas. **Revista Portuguesa de Geotecnica**, [s.l.], v. 100, p. 103-122, 2022.

COSSU, R. ; STERGMANN, R. Landfill planning and design. **Solid**

WasteLandfilling: concepts, processes, technologies, p. 755-772, 2018.

COSTA, C. de M. C. **Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos**. 2015. 181 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2015.

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

COSTA, M. D. *et al.* Estudos laboratoriais para avaliação do desempenho de camadas de cobertura de aterros sanitários em relação à redução de emissões de gases e infiltrações. **Eng. Sanit. Ambient**, [s./], v. 23, n.1, jan., fev., 2018.

D'ANGELO, R. G. **Análise numérica de infiltração em camada de cobertura de aterro sanitário**. 2016. 103 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

DA SILVA, F. H. R. **Aplicação de modelos numéricos para estimativa de recalques de uma célula do aterro sanitário de Belo Horizonte**. 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

DATTA, M.; VEERA, P. Stability of cover systems for landfills and old waste dumps. International Conference on Sustainable Solid Waste Management, Chennai, **Proceedings...** Chennai, 2007.

DENARDIN, G. P. **Estudo dos recalques do aterro sanitário da Central de Resíduos do Recreio-Minas do Leão/RS**. 2013. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2013.

DWIVEDI, S.; SUMAN, S.K Quality assessment of Road shoulders using Light Weight Deflectometer and GeoGauge. **International Journal of Recent Technology and Engineering**, [s./], v. 8; n. 8, 2019.

EID, H. T. Shear strength of geosynthetic composite systems for design of landfill liner and cover slopes. **Geotextiles and Geomembranes**, [s./], v. 29, n. 3, p. 335-344, jun., 2011.

EISENBERGER, C. **Estudo do comportamento de um talude coluvionar urbano em Santa Cruz do Sul**. 2003. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

EWING, J. *et al.* Characterizing soil stiffness using thermal remote sensing and machine learning. **Remote Sens**, [s./], v. 13, 2021.

FENG, S. *et al.* Theoretical analysis of coupled effects of microbe and root

architecture on methane oxidation in vegetated landfill covers. **Science of The Total Environment**, [s./], v. 600, p. 1954-1964, dec., 2017.

FENG, S. J.; GAO, L. Y. Seismic stability analyses for landfill cover systems under diferente see page buildup conditions. **Environmental Earth Sciences**, [s./], v. 66, n. 1, p. 381-391, may., 2012.

FERNANDES, J. G. **Estudo da emissão de biogás em um aterro sanitário experimental**. 2009. 116 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

FERNANDES, R.; SILVEIRA, B. de OLIVEIRA, M. R. Planejamento urbano “open source”: um estudo de caso na identificação de áreas para implantação de aterro sanitário. **Holos**, [s./], v. 8, 2017.

FONSECA, A. V da. **Caracterização de solos residuais em projecto geotécnico assistido por ensaios**. 2008. 90 f. Apostila. Universidade do Porto, Portugal. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/67289/2/42547.pdf>. Acesso em: 23 jun., 2022.

FRANCESCHET, M. **Estudo da permeabilidade de solos de aterros sanitários do estado de Santa Catarina**: estudo de caso aplicado a Timbó, Chapecó e Curitiba. 2006. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

FRANQUETO, R. *et al.* Monitoramento de emissões fugitivas a partir da camada de cobertura de aterro sanitário. **Rev. UNINGÁ**, [s./], v. 35, jul., 2020.

FREITAS, J. B de.; REZENDE, L. R de.; GITIRANA JÚNIOR, G de F. N. Prediction of the resilient modulus of two tropical subgrade soils considering unsaturated conditions. **Elsevier**, [s./], v. 270, n. 1, 2020.

FUNDAÇÃO NACIONAL DA SAÚDE - FUNASA. **Orientações técnicas para apresentação de projetos de resíduos sólidos urbanos**. Brasília: FUNASA, 46p., 2003.

GEBERT, J.; GROENGROEFT, A.; PFEIFFER, E. M. Relevance of soil physical properties for the microbial oxidation of methane in landfill cover. **Soil Biology and Biochemistry**, [s./], v. 43, ed. 9, p. 1.759-1.767, sep., 2011.

GUEDES, M. J. F.; RIBEIRO, M. M. R. Aplicação de metodologias de análise de conflito ambiental ao aterro sanitário de Puxinanã (PB). **Eng. Sanit. Ambient.**, [s./], v. 22, n. 1, p. 81-93, 2017.

GUEVARA M. D. F. *et al.* Escolha de áreas potenciais para localização de um aterro sanitário no município de Pelotas/RS utilizando o sistema de informações geográficas. **Tecno-Lógica**, [s./], v. 2, p. 80-90, 2017.

GUIZELINI, A. P. **Estudo do comportamento hidromecânico de solos visando a**

construção de sistemas de cobertura alternativos para aterros sanitários. 2011. 168 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

HEIBAUM, M. Geosynthetics in agricultural and aquacultural applications. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS*, 9, Guarujá. **Proceedings** [...]. Guarujá, 2010.

HENRY, E. J. Analytical and numerical modeling assessment of capillary barrier performance degradation due to contaminant-induced surface tension reduction. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s./], v. 133, n. 2, feb., 2007.

HILGER, H. A.; CRANFORD, D. F.; BARLAZ, M. A. Methane oxidation and microbial exopolymer production in landfill cover soil. **Soil Biology and Biochemistry**, [s./], v. 32, n. 4, p. 457-467, apr., 2020.

HOSSAIN, M. D S.; HAQUE, M. A. The effects of daily cover soils on shear strength of municipal solid waste in bioreactor landfills. **Waste Management**, [s./], p. 1568-1576, 2009.

HOSSAIN, M. S.; APEAGYEI, A. K. Evaluation of the Lightweight Deflectometer for In-Situ Determination of Pavement Layer Moduli. 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL, IBAM. **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos.** 2001. Disponível em: <http://www.resol.com.br/cartilha4/manual.pdf>. Acesso em: 15 jun., 2022.

IZZO, R. L. dos S.; MAHLER, C. F.; ROSE, J. L. Barreira capilar construída com resíduo pré-tratado mecânica e biologicamente. **Eng. Sanit. Ambient.**, [s./], v. 18, n. 4, p. 303-312, out./dez., 2013.

JAFARI, N. H.; STARK, T. D.; MERRY, S. The July 10 2000 Payatas Landfill Slope Failure. **International Journal of Geoenvironment**, [s./], v.2, n.3, p.208-228. 2013.

JIANGUO, L.; YONGFENG, N.; QINGZHONG, B. Analysis of structural stability in sanitary landfill. **Chongqing Environmental Science**, [s./], v. 1, 2001.

JONES, D. R. V.; DIXON, N. Landfill lining stability and integrity : the role of waste settlement. **Geotextiles and Geomembranes**, [s./], v. 23, n. 1, p. 27-53, feb., 2005.

KAIMOTO, L. S. A.; LEITE, A. J.; COELHO, M.G. Considerações sobre aproveitamento do biogás em aterro sanitário. *In: Simpósio Internacional de Tecnologias e Tratamento de Resíduos Sólidos*, Rio de Janeiro, **Anais** [...]. Rio de Janeiro, 2006.

KOELSCH, G.; BAUER, J. **Static Stability of Landfills.** 2009. Apostila. Disponível em: http://www.dr-koelsch.de/Sardinia_09_stability.pdf. Acesso em: 20 jun., 2022.

KOERNER, M. R. ; HWU, B. L. Stability and tension considerations regarding cover soils on geomembrane lined slopes. **Geotextiles and Geomembranes**, [s./], v. 10, n. 4, p. 335-355, 1991.

LAVNITCKI, L. *et al.* Diagnostic of the situation of screening and composting central as landfill during operation and after retirement in the municipality of Planalto/RS. **Revista Geográfica Acadêmica**, [s./], v. 10, n. 2, jul., 2016.

LAW, H. J. *et al.* Maximizing Landfill Capacity by Vertical Expansion: a Case Study for an Innovative Waste Management Solution. **Environmental Science**, [s./], p.9, 2013.

LEITE, T. M de C. **Entraves espaciais**: brownfield caracterizados por aterros de resíduos sólidos urbanos desativados no município de São Paulo/SP. 2005. 144 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2005.

LENKE, L. R.; GORDON McKEEN, R.; GRUSH, M. P. Laboratory Evaluation of GeoGauge for Compaction Control. **Transportation Research Record**, [s./], n. 1849, p. 20-30, 2003.

LIMA, A de. *et al.* Análise da recuperação energética do biogás de aterros sanitários. **Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, [s./], v. 12, n. 1, jun., 2017.

LIMA, G. L de. *et al.* Influência da granulometria no comportamento de solos tropicais compactados. *In*: SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA NA REGIÃO CENTRO OESTE, 5, Brasília. **Anais [...]**. Brasília, 2019.

LIMA, M. C. *et al.* Estudo comparativo de determinação do módulo de resiliência utilizando os métodos GeoGauge H4140 e Califórnia Bearing Ratio (CBR) de campo e laboratório. *In*: EXPOPAVIMENTAÇÃO, 4., Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu, 2015.

LIMA, M. J de. **Utilização de geotêxtil não tecido como elemento constituinte de barreiras capilares**. 2014. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2014.

LIMA, M. J de.; ZORNBERG, J. G.; PALMEIRA, E. M. Barreiras capilares em coberturas evapotranspirativas. *In*: CARVALHO, J. C. de. *et al.* (Org). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, p. 555-578, 2015.

LINS, E. A. M. **A utilização da capacidade de campo na estimativa do percolado gerado no aterro da Muribeca**. 2003. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, 2003.

LIRA, B. S. *et al.* 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**, [s./], v. 9, n. 11, 2020.

LIRA, B. S. **Uso de composto orgânico como material componente para camada**

de cobertura oxidativa. 2017. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

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

LISOVITSKAYA, O. *et al.* Efficiency of methane biotransformation of soil and soil-like biofilters in Moscow. **Journal of Soils and Sediments**, [s./], v. 15, p. 1764-1770, 2015.

LOCASTRO, J. K.; ANGELIS, B. L. D de. Barreiras de impermeabilização: configurações aplicadas em aterros sanitários. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, [s./], v. 20, n. 1, p. 200-210, jan.-abr., 2016.

LODI, P. C.; ZORNBERG, J. G.; BUENO, B. de S. Uma breve visão sobre geossintéticos aplicados a aterros sanitários. **Rev. Tecnol. Fortaleza**, [s./], v. 30, n. 2, p. 188-197, 2009.

LOPES, J. T. de B. **Estrutura e propriedades dos materiais.** 2011. 8 f. Apostila. Disponível em: <https://jorgeteofilo.files.wordpress.com/2011/08/epm-apostila-capitulo011.pdf>. Acesso em: 20 jun., 2022.

LOPES, M. L.; GOMES, C. C. Geotechnical landfill monitoring - adaptations needed. **Environmental Geotechnics**, [s./], v. 2, n. 1, p.8-17, 2013.

LOPES, R. L. *et al.* Camadas de coberturas metanotróficas como alternativas para gerenciamento de gases de efeito estufa em aterros sanitários. **Holos**, [s./], v. 4, n. 25, 2010.

LOPES, R. L. **Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos.** 2011. 274 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

MACEDO, M. C. **Investigação sobre o comportamento geomecânico de misturas de solo com resíduos de pneus e resíduos de construção e demolição.** 2016. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Pernambuco, Recife, 2016.

MAGALHÃES, J.S.B. **Avaliação da Gestão de Sítios Contaminados por Resíduos Perigosos nos EUA, Canadá, Países europeus e Brasil, e Exemplo de um Manual Simplificado de Avaliação de Saúde Ambiental destes Sítios para o Brasil.** 2000. 95 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) - Escola de Saúde Pública, Rio de Janeiro, 2000.

MAGALHÃES, P. R. F.; SOARES, A. B. Uso de argilas expansivas em camadas de impermeabilização de coberturas de aterros sanitários no nordeste do Brasil. **Eng. Sanit. Ambien.**, [s./], v. 26, n. 6, nov., dez., 2021.

MAJDINASAB, A.; YUAN, Q. Performance of the biotic systems for reducing methane emissions from landfill sites: a review. **Ecological Engineering**, [s.l.], v. 104, p. 116-130, July., 2017.

MALDANER, L. de S. 2011. 109 f. **Cobertura para oxidação biológica do metano em aterros de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MAMEDE, A. M. P. **Responsabilidade ambiental aplicada ao sector dos resíduos sólidos urbanos. Caso de estudo**: Aterro Sanitário de Mato da Cruz. 2014. 195 f. Dissertação (Mestrado em Cidadania Ambiental e Participação) - Universidade Aberta, Portugal, 2014.

MARANGON, M. Empuxos de terra. *In*: NuGeo (Org.). **Mecânica dos Solos**, p. 161-165, 2018.

MARIANO, M. O. H.; JUCÁ, J. F. T. Ensaio de campo para determinação de emissões de biogás em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos. **Nota Técnica, Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v.15, n.3, p.223-228, jul/set., 2010.

MARQUES, A. C. M. **Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos**. 2001. 267 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MATEUS, M. S. C. S.; BARBOSA, M. C. Estudo da influência das propriedades hidráulicas do solo no processo de evaporação. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 6., 2007, Salvador-BA. **Anais [...]**. Salvador: UFBA, v.1, p.475-482, 2007.

MATOS, F.; DIAS, R. A gestão de resíduos sólidos e a formação de consórcios intermunicipais. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, [s.l.], v. 4, n. 3, p. 501-519, set/dez., 2011.

McGUIRE, P.; GUMTOW; DOYLE, E. Evapotranspiration landfill cover design: characterization and soil environment. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 4, Arizona. **Anais [...]**. Arizona, 2006.

MEDEIROS, R. de M.; NOBERTO, A de S.; MARIANO, M. O. H. Avaliação de estabilidade de taludes de aterros sanitários. **Revista AIDIS**, [s.l.], v. 13, n. 3, dez., 2018.

MENEGOTTO, M. L. **Previsão da curva tensão-recalque de ensaios de placa em solo não saturado**. 2004. 246 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

MONTALVAN, E. L. T.; BOSCOV, M. E. G. Investigação do comportamento geotécnico de misturas de areia argilosa laterítica com lodo da estação de tratamento de água do município de Cubatão para reaproveitamento em obras de

terra. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 30., Natal. **Anais** [...]. Natal, 2019.

MORETTO, R. L. **Análise de recalques do resíduo sólido urbano confinado em uma célula experimental e em lisímetros, considerando a biodegradação**. 2018. 402 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

MORINGA, C. M. **Recuperação de Áreas contaminadas**: um novo desafio para projetos paisagísticos. 2007. 166 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MORITZ, A. *et al.* Comparação de métodos para a determinação do teor de umidade em grãos de milho e de soja. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, [s./], v. 5, n. 2, p. 145-154, 2012.

NASCIMENTO, E. C do. *et al.* Avaliação do uso do agregado reciclado da construção civil como barreira hidráulica em camadas de coberturas de aterros sanitários. **Research, Society and Development**, [s./], v. 10, n. 10, 2021.

NASCIMENTO, J. C. F do. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. 2007. 160 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

NAVES, L. C. Influência da compactação do solo sobre a produção e o potencial poluidor de lixiviados de resíduos sólidos urbanos. **Eng. Sanit. Ambien.**, [s./], v. 24, n. 5, p. 949-958, set.-out., 2019.

Neves, F. O. Gerenciamento de resíduos sólidos: problemas e perspectivas em Toledo-PR. **Caminhos de Geografia**, [s./], v.14, n. 27, p. 27-42.

NOBERTO, A. de S.; MARIANO, M. O. H.; MEDEIROS, R. de M. Avaliação do efeito da camada de cobertura na estabilidade em aterros de resíduos sólidos urbanos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 14, Bahia. **Anais** [...]. Bahia, 2018.

OBLADEN, N. L.; OBLADEN, N. T. R.; BARROS, K. R. **Guia para Elaboração de Projetos de Aterros Sanitários para Resíduos Sólidos Urbanos**. Paraná: CREA. p. 64., 2009.

OLIVEIRA, D. A. F. **Estabilidade de taludes de maciços de resíduos sólidos urbanos**. 2002. 173p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade de Brasília, Brasília, 2002.

OLIVIER, F.; GOURC, J. P. Hydro-mechanical behavior of Municipal Solid Waste subject to leachate recirculation in a large-scale compression reactor cell. **Waste Management**, [s./], v. 27, n. 1, p. 44-58, 2007.

OTHMAN, M.; FROST, M. W.; DIXON, N. Soil interface softening from capillary break

formation in Geocomposite drainage systems. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 10, Germany. **Proceedings** [...]. Berlin, 2014.

PANTELDIS, L. The equivalent modulus of elasticity of layered soil mediums for designing shallow foundations with the Winkler spring hypothesis: a critical review. **Engineering Structures**, [s./], v. 201, n. 15, 2019.

PENG, R. *et al.* Back-analyses of landfill instability induced by high water level: case study of Shenzhen landfill. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s./], v. 13, n. 126, 2016.

PENZ, R. S. **Desenvolvimento de um Inclínômetro com Tecnologia MEMS aplicado ao Monitoramento de Obras Geotécnicas**. 2013. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2013.

PEREIRA, A. G. H. **Compresibilidad de los residuos sólidos urbanos**. 2000. 281 f. Tese (Doctoral Ingeniería Del Terreno Protectos y Obra Civil) - Universidad de Oviedo, Espana, 2000.

PEREIRA, L. A.; MAIA, K. M. P. A contribuição da gestão de resíduos sólidos e educação ambiental na durabilidade de aterros sanitários. **Sinapse Múltipla**, [s./], v. 1, n. 2, p.68-80, dez., 2012.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de textos, p. 355, 2006.

POHLAND, F.G; B. AL-YOUSFI. Design and operation of landfills for optimum stabilization and biogas production. **Water Science and Technology**, [s./], v. 30, n. 12, p. 117-124, 1994.

NÚCLEO SUDESTE DE CAPACITAÇÃO E EXTENSÃO TECNOLÓGICA EM SANEAMENTO AMBIENTAL, RECESA. **Resíduos sólidos, projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários: guia do profissional em treinamento**. Ministério das Cidades (Org.). Belo Horizonte: RECESA, 2008. 120 p.

REIS, E. A.; REIS, I. A. **Análise descritiva de dados**. 2002. 64 f. Apostila. Disponível em: <http://www.est.ufmg.br/portal/arquivos/rts/rte0202.pdf>. Acesso em 15 jun., 2022.

REMÉDIO, F. H. **Análise de estabilidade de taludes de aterro de resíduos urbanos utilizando parâmetros geotécnicos de propostas bibliográficas e correlações com N_{spt}** . 2014. 131 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2014.

RÉUS, T. F.; SILVA JUNIOR, C. A. P da.; FONTENELE, B. H. Análise empírico-mecânica do efeito do excesso de carga veículos comerciais. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [s./], v. 9, n. 2, p. 57-70, 2014.

RODRIGUES, P. P. F. **Pavimentos industriais de concreto armado: projeto e critérios executivos**. 2. ed. São Paulo: ibts, p.101, 2006.

RONG, F.; ZHAOGUI, G.; TUGEN, F. Analysis of stability and control in landfill sites expansion. **Elsevier**, [s.l.], v. 24, p. 667–671, 2011.

SANT'ANNA, G. L. *et al.* Módulo de resiliência de um solo arenoso e de suas misturas com alcatrão fracionado e cal. **Sociedade de Investigações Florestais**, [s.l.], v. 27, n. 4, p. 527-534, 2003.

SANTOS, G. O. **Avaliação do cultivo de gramíneas na superfície de aterro sanitário, com ênfase para a redução da emissão de metano e dióxido de carbono para a atmosfera**. 2012. 313 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

SANTOS, G. O. **Resíduos sólidos e aterros sanitários**: em busca de um novo olhar. 1 Ed. Recife: Imprima, p. 80, 2016.

SANTOS, G. O.; MATOS, M. V. B de. Cobertura vegetal sobre célula de aterro sanitário encerrado há vinte anos no Ceará. **Ciência e Tecnologia**, [s.l.], v. 11, n. 6, 2017.

SANTOS, J.; CORREIRA, G. A. Distorção limite de referência. Sua utilidade para o estabelecimento de uma curva única de degradação do módulo de distorção do solo. **Revista Portuguesa de Geotecnia**, [s.l.], n. 95, 2002.

SANTOS, T. F. L. dos. **Estudo experimental da camada de cobertura do aterro Morro do Céu, Niterói/RJ**. 2009. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SANTOS, G. M dos. **Comportamento hidromecânico de solo e das misturas solo-composto utilizados em camadas de cobertura no aterro experimental da Muribeca, Pernambuco**. 2015. 197 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Recife, Pernambuco, 2015.

SARAVANAN, M. *et al.* Landfill interface study on liner member selection for stability. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 13, jan., 2008.

SARIHAN, N. H.; STARK, T. D. Back-Analyses of Landfill Slope Failures. 6th International Conference On Case Histories In Geotechnical Engineering, **Proceedings** [...]. 8p., paper n.2.34, 2008.

SARIHAN, N.; STARK, T. D. Back-analyses of Landfill Slope Failures. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CASE HISTORIES IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, 6th, Arlington, **Proceedings** [...]. Virgínia, 2008.

SCANLON, B. R. Evaluation of evapotranspirative covers for waste containment in arid and semiarid regions in the Southwestern USA. **Vadose Zone J.**, [s.l.], v. 4, feb., 2005.

SCHULER, A. R. **Análise do comportamento de um aterro municipal de**

resíduos sólidos urbanos instrumentado. 2010. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL - SNSA. **Conceitos, características e interfaces dos serviços públicos de saneamento básico.** Berenice de Souza Cordeiro (Org.). Lei Nacional de Saneamento Básico: perspectivas para as políticas e gestão dos serviços públicos (coletânea de livros), v.2. Brasília: Editora, p. 193, 2009.

Seyman, E. **Laboratory Evaluation In-Situ Tests as Potential Quality Control/Quality Assurance Tools.** 2003. 187 p. Thesis, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Baton Rouge, 2003.

SHARMA, H. D. Solid waste landfills: settlements and post-closure perspectives. *In*: NATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL AND PIPELINE ENGINEERING, 8, Missouri, **Proceedings** [...]. Missouri, 2000.

SILVA, M. L. **Caracterização física de solos e de resíduos sólidos do aterro sanitário metropolitana oeste de Caucaia.** 2022. 75 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental) - Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

SILVA, D. P. **Influência da contaminação por cloreto de cobre na resistência ao cisalhamento de solos utilizados em liners.** 2005. 154 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade de São Carlos, São Carlos, 2005.

SILVA, F. N da. **Resistência, rigidez e condutividade hidráulica de misturas compactadas submetidas à percolação ácida.** 2015. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul, 2015.

SILVA, P. A. D. **Estudo do fenômeno de barreira capilar:** modelagem numérica e experimentação física. 2011. 187 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

SILVA, R. A. C da. **Avaliação da evolução do comportamento geomecânico de aterros sanitários com base na realização de ensaios de laboratório e de campo.** 2017. 138 f. Dissertação (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SIMÕES, G. F. *et al.* Considerações sobre a interpretação de registros de monitoramento de recalques em aterros sanitários. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 10, Gramado. **Anais** [...]. Gramado, 2010.

SIMÕES, G. F.; CATAPRETA, C. A. A. Monitoring and modeling of long-term settlements of an experimental landfill in Brazil. **Waste Management**, [s./], v. 33, n. 2, p. 420-430, feb., 2013.

SIMÕES, G. F.; LANES, R. M. Implementação computacional de um modelo

acoplado mecânico-biológico para avaliação de recalques em aterros sanitários. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25, Recife, **Anais** [...]. Recife, 2009.

SOBÓL, E. *et al.* Laboratory Studies of Small Strain Stiffness and Modulus Degradation of Warsaw Mineral Cohesive Soils. **Minerals**, [s.l.], v. 10, 2020.

STARK, T.; SARIHAN, N.; LI, G. Shear strength of municipal solid waste for stability analyses. **Environmental Geology**, [s.l.], v. 57, p. 1911-1923, jun., 2008.

STRAUSS, M. **Análise de estabilidade de talude do Aterro Sanitário da Zona Norte de Porto Alegre**. 1998. 137p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

STROPARO, E. C. *et al.* Oxidação passiva de metano em camada de cobertura de aterros sanitários: uma revisão. *In*: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE, 2, Foz do Iguaçu. **Anais** [...]. Foz do Iguaçu, 2019.

STUERMER, M. M.; BROCANELI, P. F.; VIEIRA, M. E. M. Os aterros sanitários desativados e o sistema de áreas verdes da cidade de São Paulo: possibilidade de integração. **Revista LABVERDE**, [s.l.], n. 2, jun., 2011.

SUZUKI, D. K. **Verticalização de aterros sanitários por meio de reforço com geogrelhas e diques periféricos alteados pelo método de montante**. 2012. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

TAPAHUASCO, W. F. C. **Análise do comportamento de maciços sanitários e proposta de um novo modelo de previsão de recalques considerando a parcela de biodegradação**. 2009. 152 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

TAVARES, R. B. *et al.* Deslizamento de solo/aterro – estudo de caso: Vila Bandeirantes – Belo Horizonte, MG. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 16, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo, 2018.

TEIXEIRA, C. E. *et al.* Estudos sobre a oxidação aeróbia do metano na cobertura de três aterros sanitários no Brasil. **Eng. Sanit. Ambient.**, [s.l.], v. 14, n. 1, p. 99-108, 2009.

TEIXEIRA, I. *et al.* Influência da granulometria e umidade nas propriedades de solos a partir de ensaios destrutivos e não destrutivos. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA EM TRANSPORTE, 24, Ouro Preto. **Anais** [...]. Ouro Preto, 2015.

TEIXEIRA, P. F. **Oxidação biológica do metano em coberturas de aterros de resíduos sólidos urbanos: dinâmica do processo e aspectos geotécnicos**. 2008. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia Geotécnica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

THOM, A. *et al.* Validation of a coupled FE-model for the simulation of methane oxidation via thermal imaging. **Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics**, [s.], v. 15, n. 1, p. 433-434, 2015.

TROVATTO, A.; PORTELINHA, F. H. M. Avaliação do comportamento de barreiras capilares em interfaces entre solo fino e diferentes geossintéticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, 7, Brasília. **Anais** [...]. Brasília, 2015.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, USEPA. **Evapotranspiration Landfill Cover Systems Fact Sheet**. 2003. Disponível em: <http://www.epa.gov/tio/download/remed/epa542f03015.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2021.

VACHON, B. L.; ABDOLAHZADEH, A. M.; CABRAL, A. R. Predicting the diversion length of capillary barriers using steady state and transient state numerical modeling: case study of the Saint-Tite-des-Caps landfill final cover. **Canadian Geotechnical**, [s.], v. 52, p. 2141-2148, june, 2015.

VAN ELK, A. G. H. P., BOSCOV, M. E. G. Desafios geotécnicos advindos da Política Nacional de Resíduos Sólidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18, Belo Horizonte, **Anais** [...]. Belo Horizonte, 2016.

VELLOSSO, D. de A.; LOPES, F. de R. **Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. VIDAL, L. *et al.* Potencial de geração de biogás e energia elétrica em aterros sanitários do sul do Brasil. In: FÓRUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 9, 2018, Porto Alegre. **Anais** [...]. Porto Alegre, 2018.

VIEIRA, K. S. **Propriedades geomecânicas de um solo compactado com vermiculita para fins de cobertura em aterro de resíduos**. 2013. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

VIONE, M. T. **Modelagem matemática da evaporação da água do solo**. 2007. 80 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2007.

VITALI, O. P. **Efeito da composição de misturas de solo-cimento nos parâmetros de rigidez e de resistência**. 2008. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Porto, Porto, 2008.

VOLPE-FILIK *et al.* Criação de parques urbanos em aterros sanitários desativados, estudo do Aterro Sapopemba, São Paulo, SP. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, [s.], v. 2, n. 3, 2007.

WILLIAMS, L. O. *et al.* Design criteria and construction of a capillary barrier cover system: the Rocky Mountain Arsenal experience. In: CONFERENCE GEO-INSTITUTE OF ASMOCE, 2011. Dallas. **Proceedings** [...]. Texas, 2011.

XIAOLI, C. *et al.* Characteristics of environmental factors and their effects on CH₄ and CO₂ emissions from a closed landfill: an ecological case study of Shanghai. **Waste Management**, [s./], v 30, n. 3, p 446-451, 2010.

XU, Q. ; TOLAYMANT, T. ; TOWNSEND, T. G. Impact of pressurized liquids addition on landfill slope stability. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s./], v. 138, n. 5, apr., 2012.

XU, Q.; TOLAYMANT, T.; TOWNSEND, T. G. Impact of pressurized liquids addition on landfill slope stability. **ASCE**, [s./], v. 138, n. 4, p. 472-480, abr. 2012.

YAN, W. M.; CHIU, C. F.; YUEN, K. V. Prediction and modeling of permeability function and its application to the evaluation of breakthrough suction of a two-layer capillary barrier. **Canadian Geotechnical**, [s./], v. 54, n. 6, june, 2017.

YANG, R. *et al.* Permeability test and slope stability analysis of municipal solid waste in Jiangcungou landfill, Shaanxi, China. **Journal of the Air & Waste Management Association**, [s./], v. 66, n. 7, p. 655-662, jun., 2016.

YARGICOGLU, E. N.; REDDY, K. R. Effects of biochar and wood pellets amendments added to landfill cover soil on microbial methane oxidation: a laboratory column study. **Journal of Environmental Management**, [s./], v. 193, p. 19-31, may., 2017.

YIN, Y. *et al.* Mechanism of the december 2015 catastrophic landslide at the Shenzhen landfill and controlling geotechnical risks of urbanization. **Engineering**, [s./], v. 2, n, 2, p. 230-249, jun., 2016.

ZHANG, W.; SUN, C. Parametric analyses of evapotranspiration landfill covers in humid regions. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, [s./], v. 6, n. 4, p. 356-365, 2014.

ZORNBERG, J. G.; LAFOUNTAIN, L.; CALDWELL, J. A. Analysis and design of evapotranspirative cover for hazardous waste landfill. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s./], v. 129, n. 5, may, 2003.

ZORNBERG; J. G.; BOUAZZA, A.; McCARTNEY, J. S. Geosynthetic capillary barriers: current state of knowledge. **Geosynthetics International**, [s./], v. 17, n. 5, 2010.