



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JOSÉ IVAN DOS SANTOS JÚNIOR

**ATERRO SANITÁRIO DE BRASÍLIA: um estudo de caso sobre a
estabilidade de taludes**

Recife

2022

JOSÉ IVAN DOS SANTOS JÚNIOR

**ATERRO SANITÁRIO DE BRASÍLIA: um estudo de caso sobre a
estabilidade de taludes**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá.

Recife

2022

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

S237a Santos Júnior, José Ivan dos.
Aterro sanitário de Brasília: um estudo de caso sobre a estabilidade de taludes / José Ivan dos Santos Júnior, 2022.
70 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2022.
Inclui referências.

1. Engenharia civil. 2. Resíduos. 3. Geomecânica. 4. Drenagem de lixo. 5. Estabilidade. I. Jucá, José Fernando Thomé (Orientador). II. Título.

624 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG / 2023 - 269

JOSÉ IVAN DOS SANTOS JÚNIOR

ATERRO SANITÁRIO DE BRASÍLIA: UM ESTUDO DE CASO SOBRE A
ESTABILIDADE DE TALUDES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, comorequisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Geotecnia.

Aprovada em: 20 de dezembro de 2022.

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência

Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof. Dr. Fernando Antônio Medeiros Marinho (Examinador Externo)

Universidade de São Paulo

participação por videoconferência

Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão (Examinador Externo)

Universidade de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, que com Sua bondade infinita vem em meu auxílio nos momentos que mais necessito. Sem a Sua graça, em minha vida, nada seria possível.

À Nossa Senhora, por ser uma mãe cuidadosa que zela e intercede junto a Deus por tudo que acontece em minha vida.

À minha família, em especial, minha mãe, Luciene, meu pai, José Ivan, minhas irmãs, Jady, Juliet e Jéssica, minha vó, Luzia Berlamino (*in memorian*), todos os meus tios e tias, meus primos e primas. Suas ajudas foram fundamentais para que eu finalizasse essa etapa.

Aos meus irmãos da Comunidade Católica Obra Nova do Coração de Maria e aos meus irmãos do EJC. Obrigado por toda oração, apoio e auxílio durante todo o curso. Vocês são verdadeiros presentes de Deus em minha vida.

Aos meus amigos de Patos que sempre estiveram na torcida e incentivaram-me em todos os momentos difíceis.

Aos meus amigos do Grupo Geobabys, nas pessoas de Alice, Camila, Flávio, Italcly e Wilsom, que viveram de perto todos os acontecimentos da pós-graduação, momentos de estudo, escrita de artigos, as aflições que antecederam as provas, bem como inúmeros momentos de lazer.

Ao meu orientador, Fernando Jucá, que sempre acreditou em mim, não medindo esforços para que eu crescesse academicamente e pessoalmente, ensinando-me, sempre, a evoluir e dar um passo a mais nos meus objetivos.

Aos professores da banca por aceitarem o convite para participar como examinadores deste trabalho. Agradeço todas às contribuições e compartilhamento de conhecimentos que permitiram o aprimoramento deste trabalho.

Enfim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para realização deste trabalho, minha eterna GRATIDÃO!

RESUMO

A estabilidade geotécnica de aterros sanitários é fundamental para o adequado funcionamento desse empreendimento e para garantir a segurança global do mesmo. No Brasil, os estudos relativos à estabilidade e monitoramento geotécnico de maciços de resíduos começaram a intensificar-se a partir da ruptura em 1991 da fase AS-1 do aterro sanitário Bandeirantes no município de São Paulo na qual 65.000m³ do maciço de resíduos deslizaram em direção à Rodovia dos Bandeirantes. Durante a execução da Etapa 1 do Aterro Sanitário de Brasília, o maciço apresentou movimentações excessivas associadas ao excesso de lixiviado que extravasou em diferentes pontos dos taludes e pelos drenos de gases existentes. Estes movimentos excessivos foram identificados em inclinações das tubulações dos drenos e um processo erosivo intenso dos solos de cobertura. Portanto esse trabalho tem como objetivo realizar a análise de fluxo e estabilidade de taludes, por meio de um estudo sistemático de determinação de parâmetros geotécnicos adequados ao Aterro Sanitário de Brasília, através da aplicação de métodos de discretização por elementos finitos, considerando as etapas de deposição dos resíduos. As análises de fluxo de água e estabilidade do talude foram realizadas utilizando-se os softwares da GeoSlope: Seep/w, Sigma/w e Slope/w. As análises foram feitas de forma acoplada, utilizando-se dados de fluxo e tensões para as análises de estabilidade. As análises de estabilidade foram realizadas a cada etapa construtiva com base nas variações de tensões obtidas pelo método dos elementos finitos usando o software Sigma/w. Mediante isso, observou-se, na Etapa 1, que quando não se leva em consideração a existência de poro-pressão o FS obtido é de 1,7, ou seja, manteve-se acima do estabelecido por norma. Porém quando se introduz as poropressões, interpretadas com base em dados e observações e distribuídas de modo semelhante ao detectado pela investigação de eletroresistividade, encontra-se o fator de segurança que representa o deslocamento observado.

Palavras-chave: resíduos; geomecânica; drenagem de lixiviado; estabilidade.

ABSTRACT

The geotechnical stability of sanitary landfills is essential for the proper functioning of this enterprise and to guarantee its global safety. In Brazil, studies related to the stability and geotechnical monitoring of waste massifs began to intensify after the rupture in 1991 of the AS-1 phase of the Bandeirantes sanitary landfill in the city of São Paulo, in which 65,000m³ of the waste massif slid towards the Bandeirantes Highway. During the execution of Stage 1 of the Brasília Landfill, the massif presented excessive movements associated with excess leachate that overflowed at different points on the slopes and through the existing gas drains. These excessive movements were identified in slopes of the drain pipes and an intense erosion process of the covering soils. Therefore, this work aims to carry out the analysis of the flow and stability of slopes, through a systematic study to determine the appropriate geotechnical parameters for the Sanitary Landfill of Brasília, through the application of methods of decretization by finite elements, considering the stages of deposition of waste. Water flow and slope stability analyzes were performed using GeoSlope software: Seep/w, Sigma/w and Slope/w. The analyzes were performed in a coupled way, using flow and stress data for stability analyses. Stability analyzes were performed at each constructive stage based on stress variations obtained by the finite element method using Sigma/w software. Through this, it was observed in Step 1 that when the existence of pore-pressure is not taken into account, the FS obtained is 1.7, that is, it remained above the established by norm. However, when pore pressures are introduced, interpreted based on data and observations and distributed in a similar way to that detected by the electro-resistivity investigation, was found the safety factor that represents the excessive displacement observed.

Keywords: waste; geomechanics; leachate drainage; stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição gravimétrica dos RSU em 2008 no Brasil.	16
Figura 2 - Curva tensão-deformação de resíduos sólidos com interação das componentes de atrito e tração.	18
Figura 3 - Variação da coesão efetiva em função do nível mais baixo de tensão normal usado para o Ensaio de Cisalhamento Direto.	19
Figura 4 - Envoltórias de resistência ao cisalhamento para RSU e envoltório Bilinear utilizados para o presente estudo.	19
Figura 5 - Tensões cisalhantes resistentes e mobilizadas em uma massa de solo.	23
Figura 6 - Fatores que afetam a estabilidade de taludes de aterros sanitários.	25
Figura 7 - Aterro Sanitário de Bandeirantes (SP) antes e após a ruptura.	27
Figura 8 - Ruptura ocorrida em Rumpke (USA) em 1996.	28
Figura 9 - Ruptura ocorrida em Payatas (Filipinas) em 2000.	28
Figura 10 - Ruptura ocorrida na Indonésia, 2005.	29
Figura 11 - Fluxograma para a análise bibliométrica e cientométrica.	30
Figura 12 - Precipitação do Aterro de Brasília entre 2017 e 2020.	33
Figura 13 - Localização das fases de construção do aterro sanitário de Brasília.	34
Figura 14 - Vista aérea do aterro sanitário com a localização dos pontos de vazamento de chorume.	35
Figura 15 - Imagem com tombamento de parte do dreno vertical.	36
Figura 16 - Vazamentos e extravasamentos de chorume.	36
Figura 17 - Geometria considerada para o Aterro Sanitário de Brasília Etapa 1.	37
Figura 18 - Etapas de Execução da Etapa 1.	38
Figura 19 - Geometria da Etapa 2.	39
Figura 20 - Envoltória de ruptura adotada para o resíduo.	40
Figura 21 - Perfil Geoelétrico ASB, Etapa 1, interpretado segundo dados disponibilizados de Nível Freático e Cota altimétrica da base da Célula 01.	41
Figura 22 - Região piezométrica adotada para retroanálise.	41
Figura 23 - Curvas de retenção e condutividade hidráulica (a) e (b) Aterro de RSU (c) e (d) cobertura do aterro.	43
Figura 24 - Condições de contorno para análise de tensão deformação.	44
Figura 25 - Distribuição de poro-pressão adotada e intervalo geométrico de variação da superfície analisados.	44

Figura 26 - Condições de contorno adotadas nas análises da Etapa 2.	45
Figura 27 - Distribuição pluviométrica adotada.....	46
Figura 28 - Principais países com publicações na temática.	49
Figura 29 - Nuvem de palavras formadas a partir: (a) dos títulos; e, (b) dos resumos.	51
Figura 30 - Rede de coocorrência de palavras.	52
Figura 31 - Análise do dendograma.	53
Figura 32 - Vetores de deslocamento ao longo do alteamento das camadas.	54
Figura 33 - Superfície de ruptura para um F.S. = 1.	55
Figura 34 - Vetores de deslocamento ao longo do alteamento das camadas.	56
Figura 35 - Precipitação e vazões no aterro.	56
Figura 36 - Perfil de poro-pressão (a) no talude; (b) no topo do aterro.	57
Figura 37 - Superfície crítica da Etapa 2.....	58
Figura 38. Perfis de poro-pressão de líquidos para o (a) Dreno não obstruído (b) Dreno obstruído.....	59
Figura 39 - Variação do Fator de Segurança para o sistema não obstruído com o tempo com a precipitação aplicada ao modelo.....	60
Figura 40 - Variação do Fator de Segurança para o sistema obstruído com o tempo com a precipitação aplicada ao modelo.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição dos Resíduos segundo a Recomendação Técnica da Sociedade Alemã de Geotecnia GDA	15
Tabela 2 - Valores de peso específico de RSU	21
Tabela 3 - Métodos de análise de estabilidade de talude.	24
Tabela 4 - Rupturas no Brasil e no exterior	26
Tabela 5 - Valores de peso específico adotados.....	42
Tabela 6 - Parâmetros de Módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson.....	42
Tabela 7. Parâmetros hidráulicos adotados para cobertura.....	43
Tabela 8 - Evolução do número de publicações ao longo dos anos.	48
Tabela 9 - Principais instituições com publicações na temática.	49
Tabela 10 - Discriminação dos periódicos por total de publicações.....	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo Geral.....	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)	15
2.1.1	Gravimetria dos RSU	15
2.1.2	Propriedades Geomecânicas dos RSU	16
2.1.2.1	Resistência ao Cisalhamento de RSU	17
2.1.2.2	Ensaio de laboratório.....	20
2.1.2.3	Peso específico dos RSU	21
2.2	ATERROS SANITÁRIOS	22
2.2.1	Métodos de avaliação de estabilidade de talude.....	22
2.2.2	Estabilidade de taludes de aterros sanitários	24
2.2.2.1	Fatores de influência na estabilidade de aterros sanitários	24
2.2.2.2	Deslizamentos e acidentes em aterros sanitários	25
3	METODOLOGIA.....	30
3.1	BIBLIOMETRIA.....	30
3.1.2	Coleta de dados	31
3.1.2	Análises	32
3.2	ASPECTOS GERAIS DO ATERRO SANITÁRIO DE BRASÍLIA	32
3.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESTABILIDADE DA ETAPA 1 E 2.....	34
3.4	ANÁLISE DE FLUXO E ESTABILIDADE DE TALUDES.....	37
3.4.1	Softwares utilizados nas análises de fluxo e estabilidade e procedimentos gerais do uso	37
3.4.2	Geometrias adotadas	37
3.4.2.1	Etapa 1	37
3.4.2.2	Etapa 2	38
3.4.3	Parâmetros Geotécnicos dos Resíduos	39
3.4.3.1	Envoltória de ruptura	39
3.4.3.2	Pressões dos poros para a Etapa 1	40
3.4.3.3	Peso específico dos resíduos.....	41

3.4.3.4	Parâmetros de deformabilidade	42
3.4.3.5	Parâmetros hidráulicos.....	42
3.4.4	Condições de contorno.....	43
3.4.4.1	Análise de tensão-deformação	43
3.4.4.2	Análise por equilíbrio limite	44
3.4.4.3	Condições de contorno da análise de fluxo da Etapa 2.....	45
3.4.4.4	Poropressões na Etapa 2	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1	BIBLIOMETRIA.....	47
4.1.1	Busca na Base de Dados	47
4.1.2	Evolução Temporal das Publicações	47
4.1.3	Distribuição das publicações.....	48
4.1.4	Frequência de Palavras	50
4.1.5	Análise Fatorial	52
4.2	RETROANÁLISE DA MOVIMENTAÇÃO EXCESSIVA (ETAPA 1).....	53
4.3	ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA ETAPA 2	55
4.4	O CLIMA LOCAL E A VARIAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA	58
5	CONCLUSÕES	63
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

Os aterros sanitários são sistemas complexos de deposição de resíduos sólidos urbanos (RSU), onde os processos de compactação dos resíduos, o adequado funcionamento dos sistemas de drenagem (de líquidos e gases), a biodegradação dos resíduos orgânicos e as tensões devido ao peso próprio do maciço e das poro-pressões dos fluídos presentes, criam uma estrutura complexa em muitos aspectos e, em particular, no geotécnico. A estabilidade geotécnica de aterros sanitários é fundamental para o adequado funcionamento do sistema e para garantir a segurança global do empreendimento que envolve segurança sócio-ambiental e econômica.

No que diz respeito aos estudos sobre resistência de RSU no Brasil, alguns trabalhos têm sido desenvolvidos com o objetivo de compreender o comportamento frente à deformabilidade e resistência destes materiais, assim como processos construtivos adequados, destacando-se as pesquisas desenvolvidas por: Abreu (2015), Borgatto (2010), Corrêa (2020), Motta (2011). No Brasil, os estudos relativos à estabilidade e monitoramento geotécnico de maciços de resíduos começaram a intensificar-se a partir da ruptura em 1991 da fase AS-1 do aterro sanitário Bandeirantes, no município de São Paulo, na qual 65.000m³ do maciço de resíduos escorregaram em direção à Rodovia dos Bandeirantes (Campi, 2011).

O resíduo sólido urbano é um material que, embora seja diferente dos solos, é tratado utilizando-se os conceitos da mecânica dos solos. Desta forma, tanto os parâmetros como os procedimentos de análises são em geral os mesmo que se utilizam nas análises de solos. Nas análises de estabilidade de taludes de aterros sanitários utiliza-se, muitas vezes, o método de equilíbrio limite. Este método avalia o equilíbrio entre as forças e momentos que induzem a ruptura, em relação aos esforços que resistem a ruptura, ou seja, a resistência do material ao longo de uma superfície de ruptura. Este método não leva em conta o deslocamento do maciço, considerando apenas a ruptura. Por outro lado, embora não seja comum em análises de estabilidade de aterros sanitários, a utilização do método de elementos finitos permite realizar uma análise da evolução dos movimentos, ou uma análise de tensão-deformação, do início da aplicação do carregamento até se chegar a ruptura.

A estabilidade de um aterro sanitário está condicionada aos parâmetros de resistência dos materiais envolvidos, as tensões atuantes, e, principalmente, as pressões (ou poro-pressões) de líquidos, e gases presentes no maciço. Os parâmetros de resistência são definidos a partir da envoltória de resistência que é o limite máximo de tensões que o material pode suportar sem romper.

Conforme Khoshand *et al.* (2018) diversas características, como: composição do material, nível piezométrico e geometria, interferem na concepção dos aterros sanitários e acontecendo qualquer mudança destes, a estabilidade pode ser afetada e, por consequência, o fator segurança do maciço. Essa circunstância ocorre principalmente pela grande diversidade das características dos resíduos que se relacionam com os aspectos sociais, culturais e econômicos da região produtora do RSU.

No caso específico do ASB foram utilizados parâmetros obtidos em correlações com a composição e densidades dos resíduos aterrados, além de parâmetros obtidos em ensaios realizados em outros aterros, a partir dados laboratoriais e da literatura especializada. No período destes estudos não foi possível realizar ensaios de resistência no próprio ASB, por conta das dificuldades do momento. Por outro lado, foram utilizados o acervo de dados de monitoramento geotécnico do ASB, além dos ensaios geofísicos realizados em janeiro/2020 pela UnB.

1.1 OBJETIVOS

O presente subtópico apresenta o objetivo geral e os específicos que foram propostos para serem desenvolvidos na dissertação.

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar a análise de fluxo e estabilidade de taludes, por meio de um estudo sistemático de determinação de parâmetros geotécnicos adequados no Aterro Sanitário de Brasília, através da aplicação de métodos de discretização por elementos finitos, considerando as etapas de deposição dos resíduos;

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar estudo bibliométrico sobre fluxo e estabilidade de taludes em aterros sanitários nos últimos 20 anos;
- Realizar a retroanálise da movimentação excessiva, ocorrida na Etapa 1, sem a existência de poropressão e, ao final, considerando a sua presença e efeito.
- Analisar a estabilidade de taludes e simular o fluxo da Etapa 2 do aterro sanitário de Brasília;
- Relacionar o clima e variação do fator de segurança com o aumento de poropressão e

influência na estabilidade de talude do aterro.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

2.1.1 Gravimetria dos RSU

A composição gravimétrica corresponde à determinação dos percentuais em peso dos principais elementos encontrados no maciço de resíduos, onde o detalhamento depende do objetivo do trabalho, sendo necessário à caracterização de um ou mais elementos. (CORRÊA, 2020).

Alcântara (2007) destaca que o conhecimento da composição dos RSU possibilita uma análise preliminar da sua degradabilidade, do poder de contaminação ambiental e das alternativas de reutilização, reciclagem e valorização energética e orgânica. Isto representa uma função importante para a identificação das melhores tecnologias de tratamento de RSU.

Além da sua função operacional, a caracterização gravimétrica auxilia no planejamento da gestão dos RSU, já que as informações obtidas na composição do RSU proporcionam a realização de serviços de reciclagem, assim como serve de indicador dos padrões de consumo de um determinado público (ARAÚJO NETO *et al.* 2019).

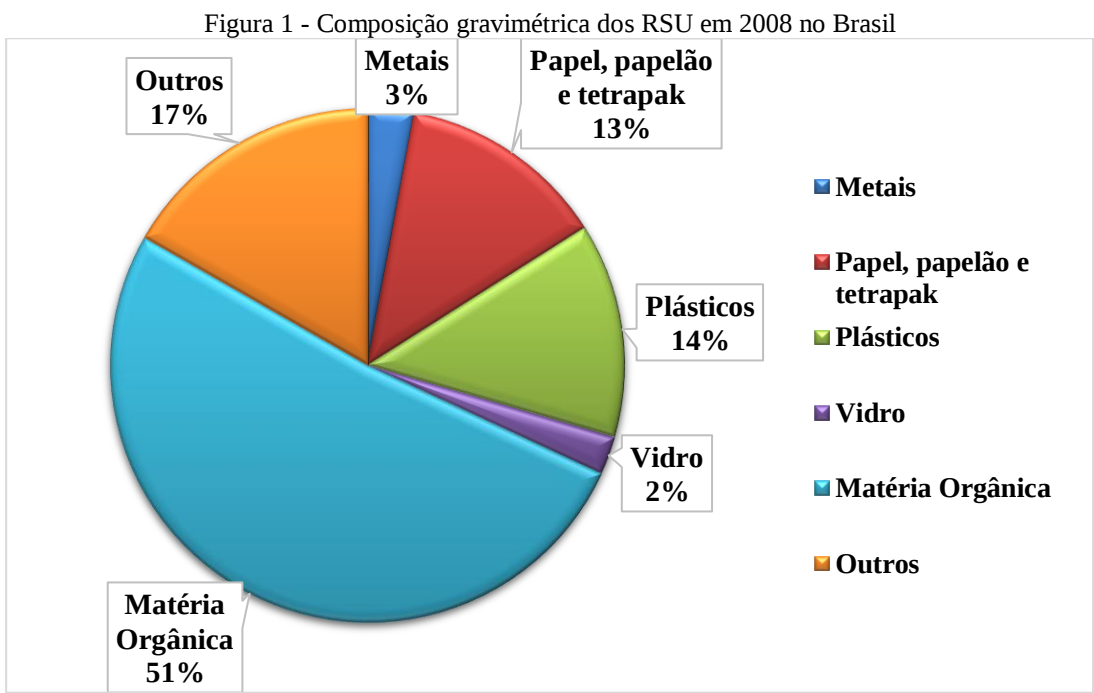
A Tabela 1 apresenta a Recomendação Técnica da Sociedade Alemã de Geotecnia GDA (DGGT, 1997), a qual divide os resíduos em 12 diferentes grupos.

Tabela 1 - Composição dos Resíduos segundo a Recomendação Técnica da Sociedade Alemã de Geotecnia GDA

CATEGORIAS	COMPONENTES	
Grandes partes	Resíduos volumosos constituídos por vários componentes. Ex.: Mobiliário; colchão; etc.	
Papelão/papel	Resíduos constituídos predominantemente de fibras de papel. Ex.: papel; papelão; material impresso; papel de parede; etc.	
Plásticos moles/ macios	Resíduos constituídos principalmente por substâncias sintéticas macias ou cujas propriedades são dominadas por tais substâncias. Ex.: embalagens (sacolas); filmes; selantes; borracha com couro macio (vestuário, coberta de móveis) ou têxtil; etc.	
Plásticos duros/ rígidos	Resíduos constituídos predominantemente por materiais sintéticos duros. Ex.: embalagens (copos de iogurte); plástico rígido; etc.	
Metais		
Minerais	Resíduos constituídos principalmente por substâncias minerais ou com comportamento mecânico e biológico semelhante (inerte). Ex.: vidro; cerâmica; etc.	
Madeira		
Orgânico	Resíduos de origem orgânica natural. Ex.: legumes; gramados; arbustos; folhagem; etc.	
Lama		
Materiais misto	Grãos 40-120 mm	Partículas de tamanhos entre 40 e 120 mm determinadas por peneiramento.
	Grãos 8 - 40 mm	Partículas de tamanhos entre 8 e 40 mm determinadas por peneiramento.
	Grãos < 8 mm	Partículas de tamanhos menores ou iguais que 8 mm determinadas por peneiramento.

Fonte: DGGT (1997); CORREIA (2020).

No Brasil, Figura 1, a quantificação da materia orgânica, em 2008, equivale a 51,4% e os resíduos recicláveis a 31,9% dos RSU gerados no Brasil. As outras quantificações equivalem a 17% (BRASIL, 2011).



Fonte: Adaptado de Brasil (2012).

A geração e composição gravimétrica dos resíduos sólidos podem sofrer influência de vários fatores socioeconômicos, sendo o tipo de habitação, densidade populacional, sexo, faixa etária, cor ou raça, renda, dentre outros (VETTER-GINDELE *et al.*, 2019; TORRENTE-VELÁSQUEZA *et al.*, 2020; VILLALBAA *et al.*, 2020).

2.1.2 Propriedades Geomecânicas dos RSU

As principais propriedades mecânicas dos RSU são influenciadas pela sua composição, assim como pelo comportamento de cada componente presente. Pois, sendo um material heterogêneo, é difícil quantificar e qualificar suas propriedades, uma vez que cada componente trabalha de uma forma distinta em virtude das alterações sofridas ao longo do tempo, como características de biodegradação, formas e dimensões, fatores que tornam difícil a elaboração de amostras e realização de ensaios (FUCALE, 2005; CORRÊA, 2020).

2.1.2.1 Resistência ao Cisalhamento de RSU

O comportamento mecânico dos resíduos sólidos urbanos, ainda hoje, é abordado conforme os métodos clássicos da mecânica dos solos, mas uma das suas principais propriedades, a resistência ao cisalhamento, expõe que estes métodos não são apropriados quando utilizados para os RSU. Pois a resistência não é gerada só pelo atrito entre os grãos, mas também pela tração entre as fibras existentes no maciço de resíduos, sendo seu comportamento similar de um solo reforçado, em que o material composto tem a matriz básica formada pelas partículas granulares finas à média e outra matriz de reforço com os materiais fibrosos dos resíduos sólidos (plásticos, têxteis, entre outros) (FUCALE, 2005; CORRÊA, 2020).

Nos estudos realizados para a análise da resistência ao cisalhamento dos RSU, há uma grande variabilidade dos parâmetros obtidos. Estas variações ocorrem em virtude da heterogeneidade e do processo de transformação dos RSU. A falta de padronização e as diversas metodologias para obtenção dos parâmetros, seja por meio de ensaios *in situ*, laboratoriais ou em retroanálises, também contribuem para a vasta faixa de variação da resistência ao cisalhamento dos RSU. Além disso, outros fatores interferem nas propriedades geotécnicas desse material como, por exemplo, o clima, a operação no aterro e a composição dos resíduos, o que torna a comparação de resultados de diferentes campos experimentais ainda mais desafiador (ABREU; VILAR, 2017).

Gonzalez (1995) relata ainda alguns fatores que podem afetar os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU:

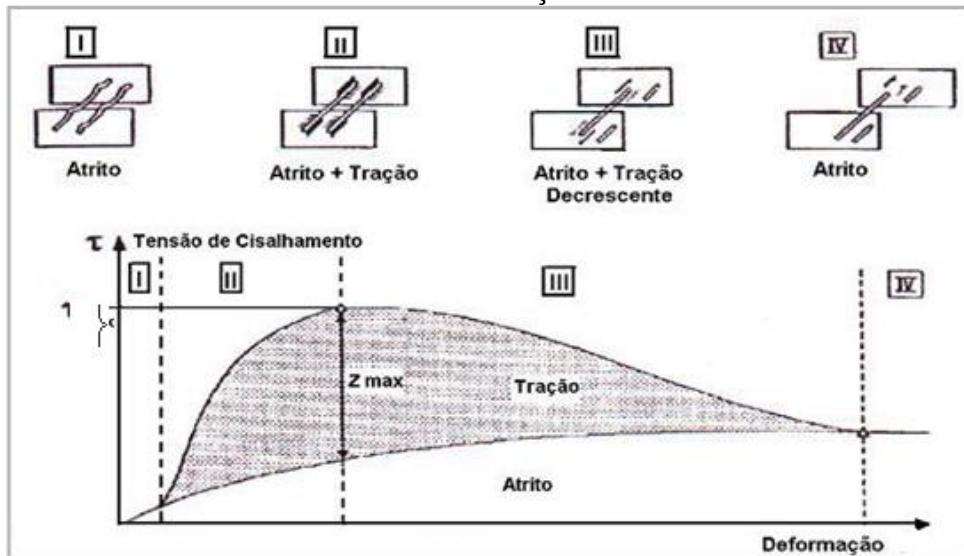
- teor de matéria orgânica e de fibras;
- idade e grau de decomposição dos resíduos sólidos;
- época em que se construiu o aterro;
- esforço de compactação, composição e quantidade de solo de cobertura.

Zhang (2020) relata ainda que os parâmetros de resistência ao cisalhamento variam amplamente entre os estudos; porém, eles são normalmente relacionados à área do aterro, componentes, idade de degradação, equipamento de teste e métodos de teste. Desse modo, é importante obter esses parâmetros de acordo com as condições específicas de cada aterro.

Kölsch (1993) *apud* Borgatto (2010) também destaca que os RSU dos aterros sanitários têm seu comportamento semelhante a de aterros de solos reforçados com geossintéticos. Sendo assim, a resistência ao cisalhamento dos resíduos é função das forças de

atrito atuantes no plano de cisalhamento e das forças de tração das fibras. A Figura 2, ilustra a interação entre as forças, segundo o modelo de Kölsch (1993).

Figura 2 - Curva tensão-deformação de resíduos sólidos com interação das componentes de atrito e tração



Fonte: Kölsch (1993).

No modelo proposto por Kölsch (1993), para pequenas deformações que correspondem à FASE I, acontece a mobilização das forças de atrito. Aumentando as deformações, as fibras são tracionadas, FASE II, aumentando a parcela das forças de tração até um valor máximo ($z_{m\acute{a}x}$) que equivale à resistência de tração das fibras e/ou a interação com o restante do resíduo. Posteriormente, acontece uma diminuição gradativa da contribuição das forças de tração, FASE III, até que se chega ao ponto no qual a resistência ao cisalhamento do resíduo é fruto apenas dos elementos de atrito (FASE IV). Então, a colaboração de cada parcela, na resistência ao cisalhamento dos resíduos, varia segundo a tensão normal atuante e a deformação.

No Brasil, as propriedades mecânicas dos RSU ainda são determinadas por meio de ensaios convencionais baseados nas teorias e conceitos da mecânica dos solos. Esta situação pode ser explicada pela ausência de metodologia específica e de bancos de dados consistentes para análise da resistência ao cisalhamento dos resíduos. Nesse cenário, faz necessário um conhecimento mais amplo das propriedades mecânicas dos RSU, principalmente, no que diz respeito às propriedades de resistência ao cisalhamento, onde os projetos de aterros sanitários, bem como parâmetros para controle de aterros em operação, poderão ser obtidos possibilitando maior segurança e economia.

A resistência ao cisalhamento dos RSU é uma propriedade necessária para avaliar a estabilidade de um aterro sanitário durante a operação e após o fechamento (BAREITHER *et al.*, 2012).

São apresentados dados da literatura para os parâmetros de resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos. A Figura 3 apresenta resultados compilados sobre a variação da coesão nos resíduos com a variação da tensão normal mínima utilizada no ensaio de Cisalhamento Direto. Na Figura 4 são apresentadas as várias envoltórias de resistência ao cisalhamento encontradas na literatura, juntamente com a envoltória utilizada nesta pesquisa.

Figura 3 - Variação da coesão efetiva em função do nível mais baixo de tensão normal usado para o Ensaio de Cisalhamento Direto

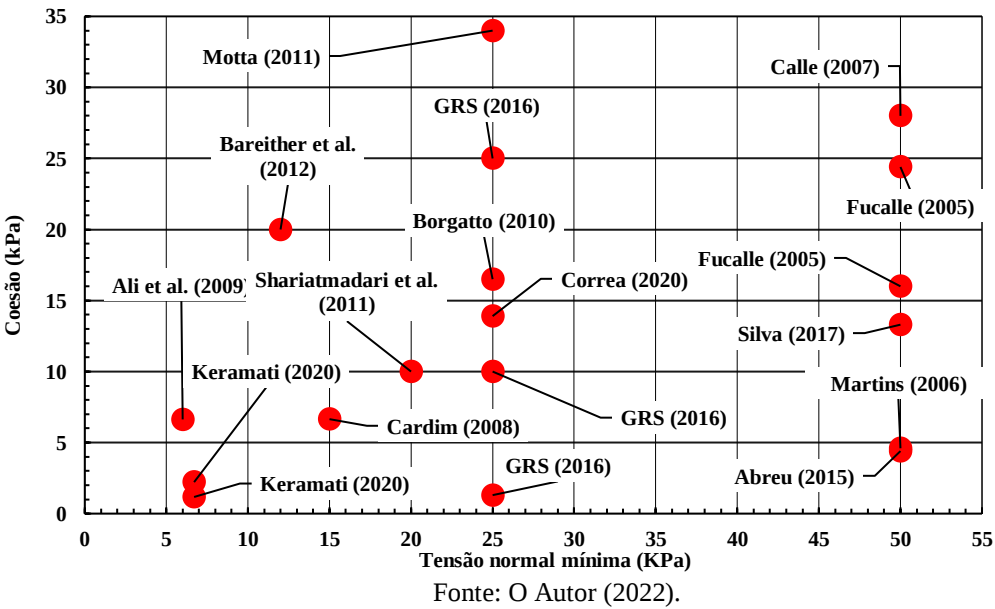
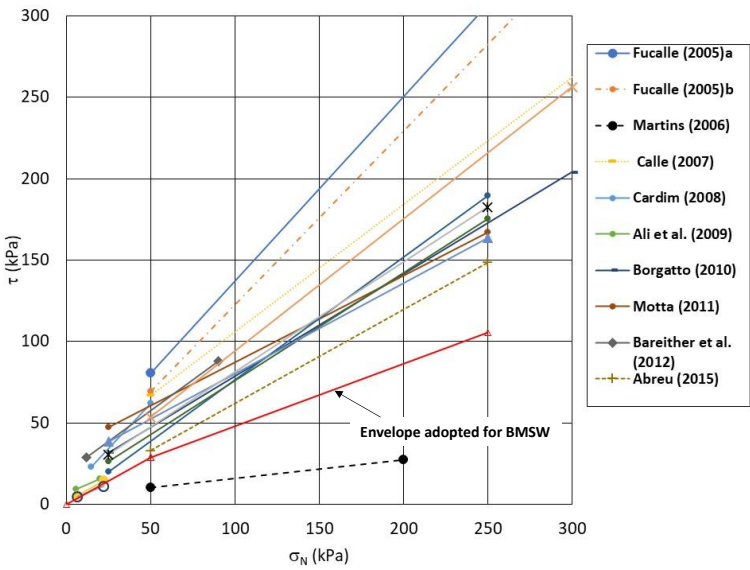


Figura 4 - Envoltórias de resistência ao cisalhamento para RSU e envoltório Bilinear utilizados para o presente estudo.



Segundo Gurjão (2021), a complexidade do estudo da tensão-deformação de RSU é muito abrangente em função da sua heterogeneidade e da variação das condições presentes nos resíduos no interior de aterros sanitários. Já que os RSU são compostos em grande parte por matéria orgânica, estes passam no interior do maciço sanitário por processos físico-químicos e biodegradativos, tornando-os mais passíveis de alterações em sua composição ao longo do tempo.

2.1.2.2 Ensaios de laboratório

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento (c e ϕ) de solos são obtidos em laboratório nos ensaios de resistência ao cisalhamento e ensaios de compressão triaxial. Por meio de tensões de ruptura e das tensões confinantes pode-se obter a envoltória de resistência de uma determinada parcela de solo (CAMPI, 2011).

O cisalhamento direto consiste num aparato que promove o deslizamento de uma metade do corpo de prova de solo em relação a outra, determinando assim, para cada tensão normal (σ_N) à superfície do deslizamento, o valor da tensão cisalhante (τ) necessária para provocar a deformação do corpo de prova até a ruptura. O ensaio é executado mantendo-se constante a tensão vertical e medindo-se a tensão cisalhante correspondente a cada deformação horizontal imposta ao corpo de prova, gerando dessa maneira a curva tensão-deformação. As deformações verticais são também monitoradas durante o processo de cisalhamento, possibilitando avaliações da variação volumétrica (ASTM D3080, 2011).

De acordo com ASTM D3080 (2011) este ensaio pode ser executado em três modalidades: Ensaio rápido, Ensaio Adensado Rápido e Ensaio lento (Inundado). Entretanto, como não há controle, drenagem e nem medida de pressões neutras, a realização de cada um destes ensaios está condicionada às características do solo testado e à velocidade de deslocamento cisalhante imposta ao corpo de prova.

A grande dificuldade na realização de ensaios laboratoriais compreende justamente a coleta e obtenção de amostras representativas, em função da composição heterogênea dos RSU e da demanda de equipamentos de médio e grande portes, conforme o tipo de resíduo estudado (BORGATTO, 2010).

2.1.2.3 Peso específico dos RSU

O peso específico representa a relação entre o peso e o volume unitário no maciço de resíduos e seu valor se altera conforme cada etapa considerada, isto é, desde sua geração até o destino final nos aterros, alterando-se, também, com o tempo (BORGATTO, 2010).

O cálculo do peso específico e a realização da composição gravimétrica possibilitam a escolha do destino adequado para cada resíduo, permitindo a segregação dos resíduos e rejeitos na fonte geradora (REZENDE *et al.*, 2010).

O peso específico dos RSU interfere, de forma direta, na resistência ao cisalhamento e na vida útil de um aterro (HANSON *et al.*, 2010), sendo também um procedimento de caracterização quantitativa dos RSU produzidos por uma determinada população (AYUBA *et al.*, 2013). Este parâmetro pode ser utilizado na determinação de outras características físicas do RSU, como índice de vazios, porosidade e grau de saturação, além de serem variáveis importantes em análises da estabilidade de aterros sanitários (HETTIARACHCHI *et al.*, 2007; REDDY *et al.*, 2011; BAREITHER *et al.*, 2012). A Tabela 2 apresenta valores de peso específico publicados da literatura:

Tabela 2 - Valores de peso específico de RSU

Autor	Peso Específico (kN/m³)	Local/Condições
KAIMOTO e CEPOLINA (1997)	5,0 – 7,0	Resíduos novos não decompostos e pouco compactos
	9,0 – 13,0	Resíduos após compactação
GABR e VALERO (1995)	8	Resíduo Saturado
BENVENUTO e CUNHA (1991)	10	Condição Drenada
	13	Condição Saturada
	7	Resíduos novos
SANTOS e PRESA (1995)	10	Resíduos após ocorrência de recalque
MAHLER e ITURRI (1998)	10,5	Sítio São João com 10 meses de alteamento
SARSBY (2000)	1,2 – 3,0	Resíduo lançado no aterro
KAVAZANJIAN (2001)	10,0 – 20,0	EUA
	12,2 – 14,8	Ensaio Percâmetro, Paracambi-RJ

SILVEIRA (2004)	18,2	Ensaio tipo vala, Gramacho-RJ
	9,15	Ensaio tipo vala, Nova Iguaçu - RJ
BAUER (2006)	8,6 – 15,6	Aterro com Resíduos Degradados
CATA PRETA <i>et al.</i> (2005)	7,0 – 11,0	Aterro Sanitário
CARVALHO (2006)	9,47 – 16,36	Paracambi-RJ
	9,99 – 11,75	Ensaio Percâmetro, Santo André - SP
	7,35	Resíduo Fresco, População Baixa renda
OCHS e SHANE (2006)	4,9	Resíduo Fresco, População Classe Média
	1,96	Resíduo Fresco, População Classe Alta

Fonte: Adaptado de Borgatto (2010).

2.2 ATERROS SANITÁRIOS

2.2.1 Métodos de avaliação de estabilidade de talude

As análises de estabilidade de taludes são realizadas, geralmente, por dois métodos: por métodos de equilíbrio limite (LEM) e por métodos de elementos finitos (FEM). Os métodos de equilíbrio limite são baseados no equilíbrio estático de forças e/ou momentos, enquanto, os métodos de elementos finitos são baseados nas relações de tensão-deformação dos materiais. Os métodos de equilíbrio limite são, ainda nos dias de hoje, os métodos mais utilizados, já que são aqueles com que os engenheiros têm mais experiência e familiaridade. (SILVA, 2016).

O intuito da análise de estabilidade é a avaliação de uma possível ocorrência de escorregamento no maciço de solo ou resíduos presentes em talude natural ou construído (GERSCOVICH, 2016; ARAÚJO NETO, 2021). As análises de estabilidade de taludes determinísticas são executadas levando em consideração o fator de segurança estabelecido pela relação, Figura 5, entre as tensões cisalhantes mobilizadas e a resistência ao cisalhamento (GERSCOVICH, 2012). Assim, para DAS (2007), o fator de segurança pode ser expresso pela equação:

$$Fs = \frac{\tau_f}{\tau_d}$$

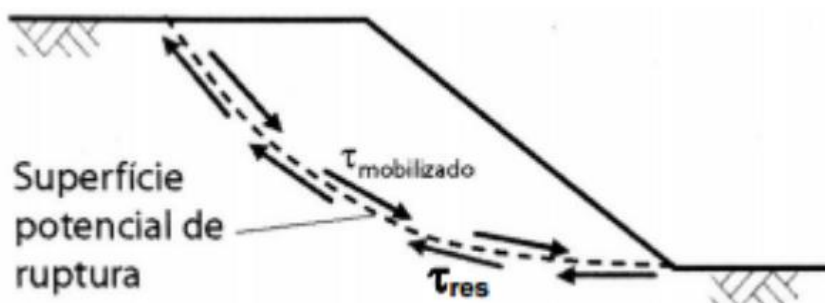
Onde:

Fs = Fator de segurança

τ_f = Resistência ao cisalhamento

τ_d = Tensões cisalhantes desenvolvidas ao longo da superfície de ruptura

Figura 5 - Tensões cisalhantes resistentes e mobilizadas em uma massa de solo



Fonte: (GERSCOVICH, 2016).

Sobre esse método Gerscovich (2016), relata:

Esse tipo de abordagem é denominado determinístico, pois estabelece um determinado valor para o FS. O FS_{adm} de um projeto corresponde a um valor mínimo a ser atingido e varia em função do tipo de obra e vida útil. A definição do valor admissível para o fator de segurança (FS_{adm}) depende, entre outros fatores, das consequências de uma eventual ruptura em termos de perdas humanas e/ou econômicas (GERSCOVICH, 2016, p. 85).

A NBR 11682 (ABNT, 2009), aborda sobre a estabilidade de taludes levando-se em conta as condições para estudo, projeto, execução, controle e observação de obras de estabilização. Na norma são estabelecidos valores de fator de segurança mínimos a serem adotados em projetos de taludes e encostas, conforme o grau de segurança determinado para o local de implementação da obra.

Ou seja, os métodos convencionais de cálculo de estabilidade de taludes desenvolvidos na engenharia geotécnica são rotineiramente utilizados para análises de estabilidade em aterros sanitários por pesquisadores e profissionais especializados. Entretanto, estas metodologias de trabalho foram utilizadas para estudos em maciços com composição e comportamento mecânico diferente dos aterros de resíduos urbanos que têm comportamento mecânico pouco conhecido, são heterogêneos, anisotrópicos e podem sofrer influência de gases e líquidos gerados a partir da decomposição dos resíduos (REMÉDIO, 2014).

A Tabela 3, apresenta métodos mais utilizados e difundidos na análise de estabilidade de talude.

Tabela 3 - Métodos de análise de estabilidade de talude

MÉTODOS		
LINEARES (não consideram as fatias)		Método do momento
		Taludes Infinitos
		Método de Culman
		Método de Rendulic
		Método do círculo de atrito
NÃO LINEARES (consideram as fatias)	Superfície circular	Método de Fellenius
		Método de Bishop
		Método de Bishop Modificado
	Superfície qualquer	Método de Spencer
		Método de Morgenstern-Price
		Método de Janbu
		Método de Sarma
		Método dos Blocos

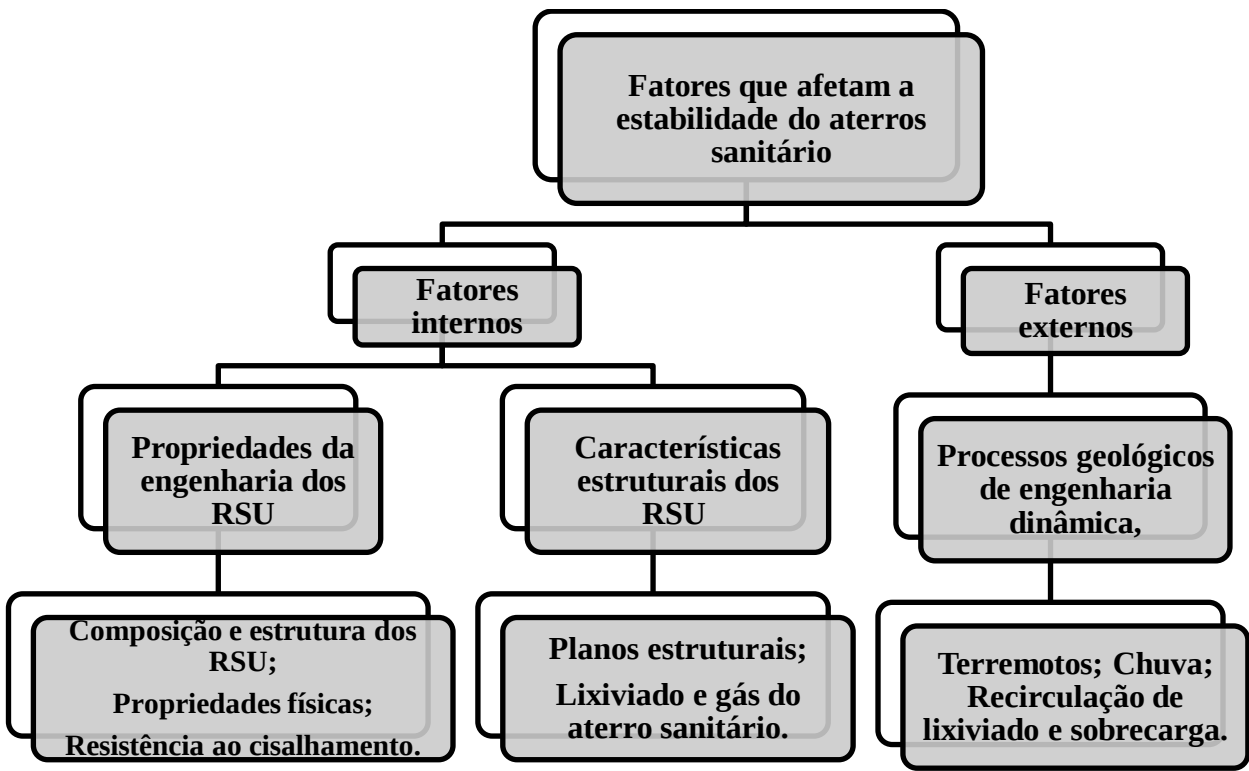
Fonte: Silva (2007).

2.2.2 Estabilidade de taludes de aterros sanitários

2.2.2.1 Fatores de influência na estabilidade de aterros sanitários

Huang e Fan (2016) relatam que diante da complexidade das propriedades dos RSU, os maciços sanitários podem se tornar instáveis quando influenciados por fatores externos, sendo a estabilidade do sanitário um dos problemas mais frequentes na operação de aterro sanitários. Eles destacam também alguns fatores internos que podem afetar a estabilidade de aterros, conforme ilustra a Figura 6.

Figura 6 - Fatores que afetam a estabilidade de taludes de aterros sanitários.



Fonte: Modificado Huang e Fan (2016).

Segundo Zhang (2020), a instabilidade de aterros sanitários pode ocasionar vítimas, poluição ambiental e danos às edificações; deste modo, garantir a estabilidade e a operação adequada dos aterros é uma tarefa de suma importância para órgãos públicos, bem como para às comunidades que vivem no entorno do empreendimento. O autor relata, ainda, em seu estudo, que as cinco causas principais de instabilidade em aterros são o alto nível de lixiviado; compactação inadequada de RSU; a capacidade de carga insuficiente da fundação; baixo resistência ao cisalhamento da interface liner-RSU; e a liberação rápida e subsequente deflagração do gás de aterro.

Conforme Stratuss (1998), os fatores mais importantes e que podem afetar a análise de estabilidade em aterros sanitários são: propriedades do solo de fundação; resistência ao cisalhamento e peso específico dos RSU; geometria do talude; nível do lixiviado e seu padrão de fluxo dentro do aterro; tipo de cobertura e resistência da cobertura à erosão.

2.2.2.2 Deslizamentos e acidentes em aterros sanitários

Huang e Fan (2016) revisaram casos de falhas em aterros sanitários no mundo e descobriram que vítimas fatais e perdas econômicas significativa podem ser atribuídas a

deslizamentos de terra e instabilidade dos maciços sanitários. A estabilidade do talude do aterro sanitário é, desse modo, uma questão crucial para o gerenciamento do aterro (KOERNER; SOONG, 2000; MERRY *et al.*, 2006; XU *et al.*, 2012). Benvenuto (2016) relata que o escorregamento de taludes e encostas é algo que os engenheiros e geólogos trabalham sempre para que não aconteça ou, pelo menos, para minimizar os seus riscos.

Benvenuto (2016) destaca, Tabela 4, as principais rupturas nacionais e internacionais até o ano de 2011, especificando o local, deslocamento e o volume desses eventos:

Tabela 4 - Rupturas no Brasil e no exterior			
Rupturas Nacionais	Ano	Deslocamento (m)	Volume (m³)
Aterro Sanitário de Bandeirantes	1991	300	65.000
Aterro Controlado Itapecerica	1992	40	8.000
Aterro Controlado Itaquaquecetuba	1995	200	100.000
Aterro Sanitário Sertãozinho, Mauá	2001	600	1.000.000
Aterro Controlado Juiz de Fora	2004	250	70.000
Aterro Controlado Itapecerica	2006	400	150.000
Aterro Sanitário Itaquaquecetuba	2011	300	300.000
Rupturas Internacionais	Ano	Deslocamento (m)	Volume (m³)
Rumpke (USA)	1996	-	1.200.000
Dona Juana (Colômbia)	1997	1200	800.000
			13000 a
Payatas (Filipinas)	2000	-	16000
Navarro (Colômbia)	2001	150	350.000
Leuwigaiah (Indonésia)	2005	900	2.700.000

Fonte: Benvenuto (2016).

A Figura 7, a seguir, ilustra ruptura em 1991 da fase AS-1 do aterro sanitário Bandeirantes no município de São Paulo, na qual 65.000m³, do maciço de resíduos, escorregaram em direção à Rodovia dos Bandeirantes.

Figura 7 - Aterro Sanitário de Bandeirantes (SP) antes e após a ruptura



Fonte: Benvenuto (2016).

Vale salientar que os projetos e construções de aterros sanitários no Brasil têm adotado critérios e parâmetros de projetos embasados em outros países, sem levar em consideração à validação para as condições locais. Os RSU gerados no Brasil têm composição, no que diz respeito a matéria orgânica e umidade, muito distinta e a simples adoção de parâmetros geotécnicos “importados” para os aterros sanitários brasileiros não é suficiente (SCHULER, 2010).

Kölsch (2010) relata ainda sobre diversas rupturas ocorridas, enfatizando as ocorridas em Rumpke (USA), 1996 (Figura 8), Payatas (Filipinas), 2000 (Figura 9) e Bandung Indonésia, 2005 (Figura 10).

Figura 8 - Ruptura ocorrida em Rumpke (USA) em 1996.



Fonte: Kolsch (2010).

Em Payatas (Filipinas), ilustrado na Figura 9, cerca de 330 pessoas foram atingidas por um volume de 16.000 m³ de resíduos, em que apenas 58 foram resgatadas com vida (MERRY; KAVAZANJIAN; FRITZ, 2005).

Figura 9 - Ruptura ocorrida em Payatas (Filipinas) em 2000.



Fonte: Kolsch (2010).

No aterro de Leuwigajah, Figura 10, a movimentação de 2.700.000 m³ de resíduos resultou na morte de 147 pessoas (KÖLSCH et al., 2005).

Figura 10 - Ruptura ocorrida na Indonésia, 2005.



Fonte: Kolsch (2010).

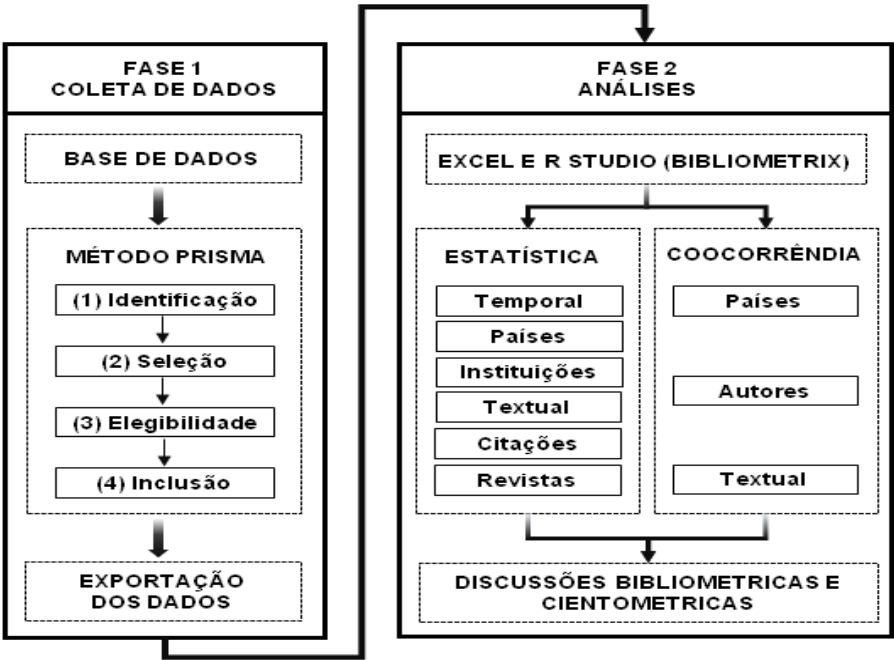
3 METODOLOGIA

3.1 BIBLIOMETRIA

É de conhecimento geral que na última década ocorreu um aumento no número de publicações de revisões de literatura utilizando análises bibliométricas para analisar as tendências de trabalhos (Ellegaard & Wallin, 2015). Neste sentido, a bibliometria possibilita avaliar estatisticamente a literatura técnico-científica sob diversas óticas, proporcionando a afinidade entre o pesquisador e o campo de estudo, assim como conectando e alinhando os objetivos da pesquisa à relevância do conteúdo em questão (Ensslin, Dutra, Ensslin, Chaves, & Dezem, 2015). Os estudos bibliométricos fazem parte da cientometria, que é estabelecido como um estudo de mensuração e de quantificação do processo científico, tendo como base indicadores bibliométricos, sendo também um campo acadêmico que tem estabelecido linhas de perguntas, de metodologias e de identidade distintas (Ramy, Floody, Ragab, & Arisha, 2018).

A pesquisa é caracterizada como descritiva com enfoque quantitativo, através da análise bibliométrica e cientométrica. Assim, foram analisados os indicadores bibliométricos nos aspectos quantitativos da produção científica e os indicadores cientométricos nos aspectos quantitativos da ciência. Dessa forma, o trabalho foi dividido em duas fases: (1) Coleta de dados e (2) Análises (Figura 11).

Figura 11 - Fluxograma para a análise bibliométrica e cientométrica.



3.1.2 Coleta de dados

Para analisar os indicadores bibliométricos e cientométricos foi realizada uma busca por artigos científicos publicados sobre a temática de Estabilidade de taludes, aterro sanitário e resistência ao cisalhamento visando investigar como a comunidade científica está tratando tais assuntos.

Para o levantamento de dados, utilizou-se a base de dados da Scopus, que, segundo De Paula, Shimoda, Batista e Santos Júnior (2017), é considerada uma das maiores bases de dados entre citações e resumos de literatura científica com revisão por pares, oferecendo ferramentas para rastrear, analisar e visualizar pesquisas das mais diversas áreas de conhecimento, permitindo uma visão ampla do que está sendo publicado no mundo. A plataforma Scopus abrange anualmente maior número de registros bibliográficos, totalizando mais de 55 milhões de registros que datam desde 1823, o que representa uma alternativa consistente de fonte global de informação científica (Mongeon & Paul-Hus, 2015).

A delimitação foi realizada por meio da sistematização de quatro etapas, Identificação, Seleção, Elegibilidade e Inclusão, definidas pela metodologia conhecida como os Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-Análises – PRISMA (Moher, Liberati, Tetzlaff, & Altman, 2010). De acordo com Pacheco, Silva, Melo e Riera (2018), o PRISMA é amplamente utilizada para analisar estudos publicados em diversos seguimentos da ciência.

Na etapa de Identificação foi aplicada a consulta na plataforma através de Title – Abstract – Keywords, com a aplicação simultânea dos termos “slope stability”, “landfill” e “shear strength”, com a finalidade de tentar atingir uma maior abrangência dos estudos relacionados a Estabilidade de Taludes de aterros sanitário. Depois, na etapa de Seleção, aplicaram-se os seguintes filtros: espaço-temporal (2002 a 2022); tipo de periódico (revistas científicas); tipo de produção científica (artigo de pesquisa); idioma do manuscrito (inglês). Na sequência, na etapa de Elegibilidade, foram realizadas as leituras dos títulos e dos resumos dos artigos para triagem dos trabalhos que tinham relação direta com a temática abordada. Por fim, na etapa de Inclusão, foram lidos os artigos na íntegra, a fim de deixar somente as pesquisas com o foco desse estudo. Em seguida, os dados contendo informações sobre os artigos foram exportados no formato .bib, que é lido pelos softwares de bibliometria.

3.1.2 Análises

Os dados bibliométricos dos artigos científicos selecionados, a partir da aplicação da sistematização da metodologia PRISMA, foram exportados e inseridos nas etapas de tratamento dos dados e análise cientométrica e bibliométrica dos dados coletados. Dessa forma, foi realizado o levantamento bibliométrico e cientométrico com auxílio do software livre R Studio – pacote Bibliometrix. Segundo Geng et al. (2017), essa metodologia é reconhecida como um mecanismo de pesquisa estabelecida na área de ciência da informação, utilizando análises por métodos quantitativos, qualitativos e estatísticos para analisar informações de um conjunto de dados.

Posteriormente, adotaram-se as seguintes etapas: tratamento dos dados e análises quantitativa e textual/qualitativa. Isso foi possível por meio do software R Studio – pacote Bibliometrix, que fornece um vasto campo de importação de dados bibliográficos de diversas bases de dados, que auxiliam a realização de análises bibliométricas, facilitando a construção de dados.

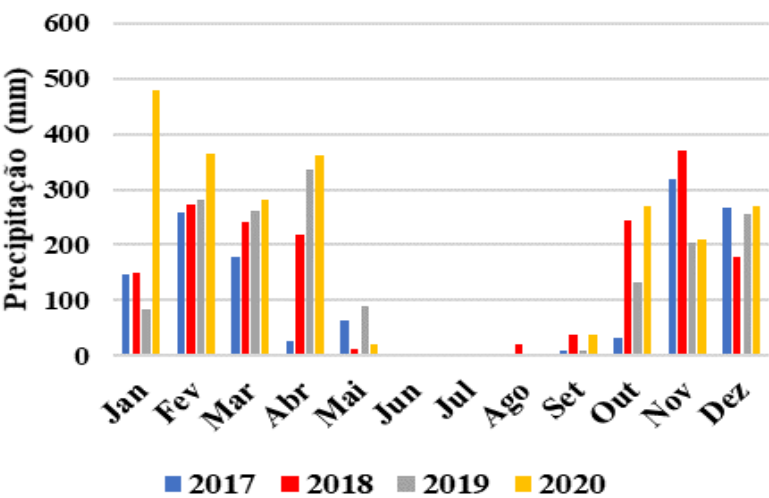
Após o tratamento dos dados, a elaboração de gráficos e de tabelas mostrou-se necessárias para explanação dos resultados. A quantificação e a identificação de trabalhos sobre a produção científica de Estabilidade de taludes ao longo dos anos informaram o desenvolvimento da literatura sobre a temática, além da espacialização dos trabalhos desenvolvidos (Liu et al., 2019). A análise textual dos textos abrangeu os termos presentes nos títulos e nos resumos dos artigos selecionados através da elaboração da frequência das palavras por nuvem de palavras, da rede de coocorrência e do dendograma. A análise lexical possui grande importância para o entendimento da nuvem de palavras (Ramos, Rosário-Lima, & Amaral-Rosa, 2018), pois realiza o agrupamento dos termos devido a quantidade de repetição destes no corpo textual, existindo palavras maiores e menores a depender da frequência (Melchior & Zanini, 2019).

3.2 ASPECTOS GERAIS DO ATERRO SANITÁRIO DE BRASÍLIA

O Aterro Sanitário de Brasília do Distrito Federal - ASB-DF está implantado na Região Administrativa de Samambaia, no Distrito Federal, entre o córrego Melchior e a Rodovia DF-180, próximo às estações de tratamento de esgotos ETE Melchior e ETE Samambaia, a uma distância de 30Km do centro de Brasília. O clima no Distrito Federal é tropical, com primaveras e verões quentes e úmidos (setembro a dezembro); e outonos e invernos frios e secos (junho a setembro). Temperatura varia entre 22 e 40°C e a umidade

relativa média anual de 67,6%, variando de 49% em agosto a 79% em dezembro. As precipitações anuais variam bastante, desde meses que não chovem até períodos de chuvas intensas de 400 a 500mm por mês, conforme ilustra a Figura 12.

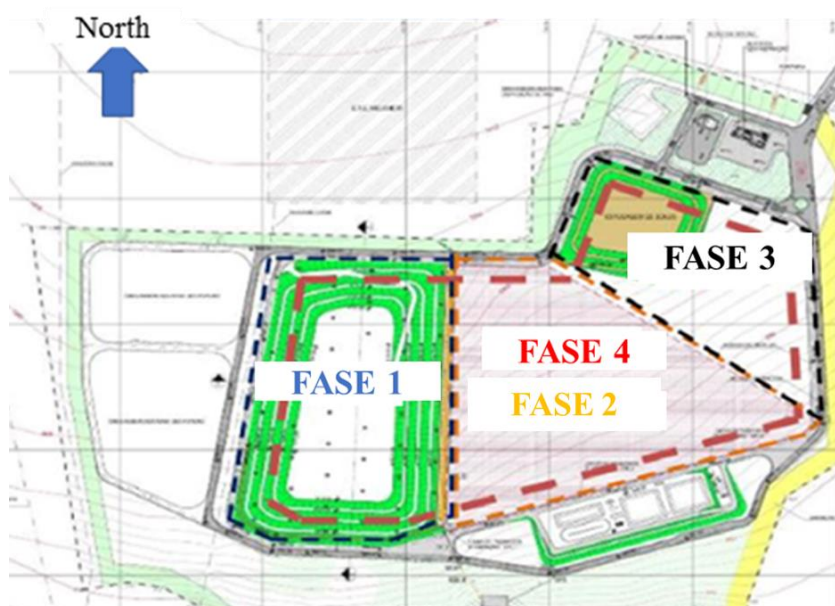
Figura 12 - Precipitação do Aterro de Brasília entre 2017 e 2020.



Fonte: INMET (2022).

O projeto do Aterro de Brasília foi concebido e adaptado às condições planialtimétricas da superfície do solo, considerando aspectos como vegetação, áreas disponíveis, acessos e distâncias de rios, córregos e nascentes. A implantação aterro está ocorrendo em 4 etapas sequenciais (Etapas 1, 2, 3 e 4). A implantação do Aterro de Brasília teve início em 2015 e está ocorrendo em 4 fases sequenciais. A Fase 1 contempla a implantação de uma área inicial de aproximadamente 110.000m², localizada na parte leste da própria área de disposição de resíduos; a Fase 2 está localizada na porção central; a Fase 3 na região sudoeste, que também deverá ser utilizada como área de armazenamento de solo durante a implantação e operação das fases que a precedem; e, por fim, a Fase 4 deverá ser realizada sobre as fases anteriores. Ao final da construção, o aterro ocupará uma área total de 320.000m² e terá acumulado 8,2 milhões de toneladas. O arranjo geral do aterro com a identificação das fases pode ser visto na Figura 13. As características e propriedades do subsolo foram estudadas através de investigação geotécnica *in situ*. Para a Fase 1, foi realizado com base em 23 Testes de Penetração Padrão (SPT). O subsolo consiste em uma camada superior de argila arenosa de 3m de espessura e SPT de 5, seguida por uma camada de silte arenoso de 6m de espessura e SPT médio de 12. O nível da água variou entre 3,50m e 6,70m, abaixo dos níveis de escavação recomendados.

Figura 13 - Localização das fases de construção do aterro sanitário de Brasília.



Fonte: O Autor (2022).

O Aterro de Brasília recebe cerca de 2.200T de resíduos por dia. A composição predominante dos resíduos são alimentos e resíduos de jardim (47%); seguidos de plásticos (15%); papel e papelão (11%); roupas e madeira (7%), sendo o restante areia, cascalho e pedras. O monitoramento geotécnico e ambiental do aterro sanitário de Brasília foi realizado após as movimentações excessivas em janeiro de 2019 por meio da instalação e manutenção de instrumentos de monitoramento, tais como: piezômetros e marcos superficiais que se destinam a monitorar parâmetros ligados à estabilidade e segurança do aterro. Poços de monitoramento de águas subterrâneas, bem como monitoramento de águas superficiais, são usados para avaliar a qualidade da água da região. A inspeção visual de rotina também é realizada para verificar características que possam indicar problemas de estabilidade e segurança.

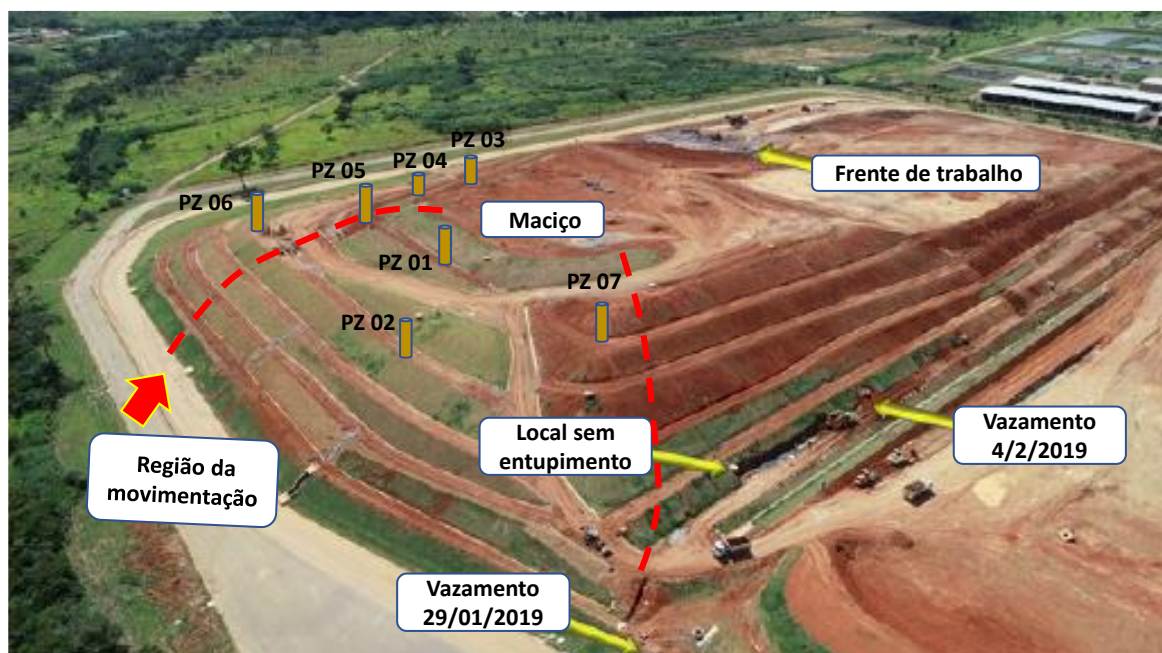
3.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESTABILIDADE DA ETAPA 1 E 2

Durante a execução da Etapa 1, do Aterro Sanitário de Brasília, o maciço apresentou movimentações excessivas associadas ao excesso de lixiviado que extravasou em diferentes pontos dos taludes e pelos drenos de gases existentes. Esta movimentação excessiva foi identificada no relatório de fevereiro de 2019 da ADASA (2019, 2019a). Estes movimentos excessivos também foram identificados em inclinações das tubulações dos drenos e um processo erosivo intenso dos solos de cobertura. Esses extravasamentos continuaram até abril de 2019.

Ainda, durante este período, o lixiviado foi bombeado para fora do aterro através dos drenos, reduzindo o nível de lixiviado no interior do maciço, reduzindo as pressões existentes e normalizando os movimentos, que entraram em uma faixa de normalidade. Posteriormente foi verificado que os movimentos excessivos, ou escorregamentos da massa, ocorreu por conta do excesso de poropressão, associada a obstrução do sistema drenagem.

A Figura 14 apresenta uma vista geral do aterro com a identificação dos dois primeiros pontos de extravasamento de lixiviado, indicação da região onde ocorreu a movimentação de ruptura e localização aproximada dos piezômetros instalados posteriormente. Salienta-se que naquele momento a instrumentação do aterro não dispunha de controles de nível de lixiviado no interior do maciço, nem medidores de poro-pressões, que foram instalados nesta região da célula após o evento. A movimentação ocorrida, que caracteriza uma ruptura localizada nesta região do maciço pode ser visualizada na imagem apresentada na Figura 15.

Figura 14 - Vista aérea do aterro sanitário com a localização dos pontos de vazamento de chorume.



Fonte: modificado de ADASA (2019).

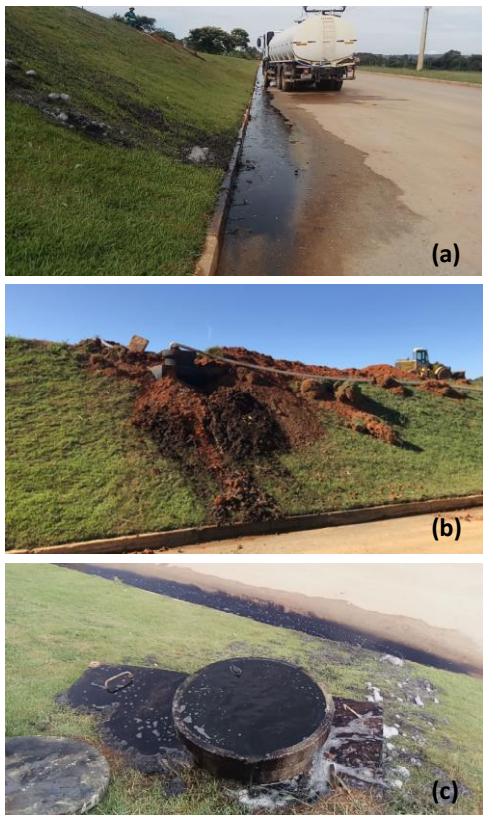
Figura 15 - Imagem com tombamento de parte do dreno vertical



Fonte: modificado de ADASA (2019).

O nível elevado do lixiviado, no interior maciço, pode ser avaliado pelas imagens apresentadas na Figura 16, onde se observa o extravasamento já na altura da primeira berma.

Figura 16 - Vazamentos e extravasamentos de chorume



Fonte: ADASA (2019).

3.4 ANÁLISE DE FLUXO E ESTABILIDADE DE TALUDES

3.4.1 Softwares utilizados nas análises de fluxo e estabilidade e procedimentos gerais do uso

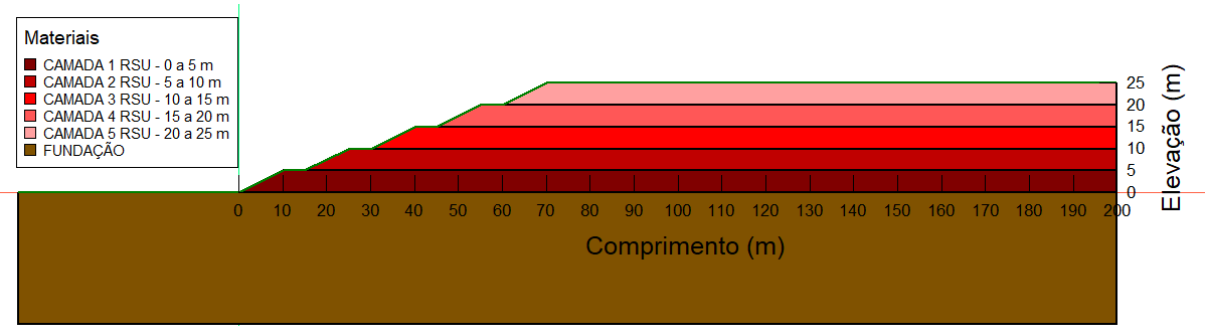
As análises de fluxo de água e estabilidade do talude foram realizadas utilizando-se os *softwares* da GeoSlope: Seep/w (análise de fluxo com consideração do efeito do clima local), Sigma/w (análise de tensões das etapas construtivas) e Slope/w (análise de estabilidade pelo método do equilíbrio limite). As análises foram feitas de forma acoplada, utilizando-se dados de fluxo e tensões para as análises de estabilidade. As análises de estabilidade foram realizadas a cada etapa construtiva (as etapas estão definidas no item a seguir) com base nas variações de tensões obtidas pelo método dos elementos finitos usando o software Sigma/w. Desta forma cada análise por equilíbrio limite considerou o estado de tensão devido ao carregamento. Nos estudos do novo projeto foram utilizados dados de fluxo associados ao clima local, nas análises por equilíbrio limite. Neste caso só a geometria final foi analisada.

3.4.2 Geometrias adotadas

3.4.2.1 Etapa 1

A parte do aterro que sofreu um processo de ruptura possuía uma altura total 25m e sua “execução”, para fins de análise, foi feita considerando-se camadas de 5 metros. Os taludes possuem uma geometria de 1V:2H, com bermas de 2m de largura. A Figura 17 ilustra a geometria final adotada nas análises da Etapa 1.

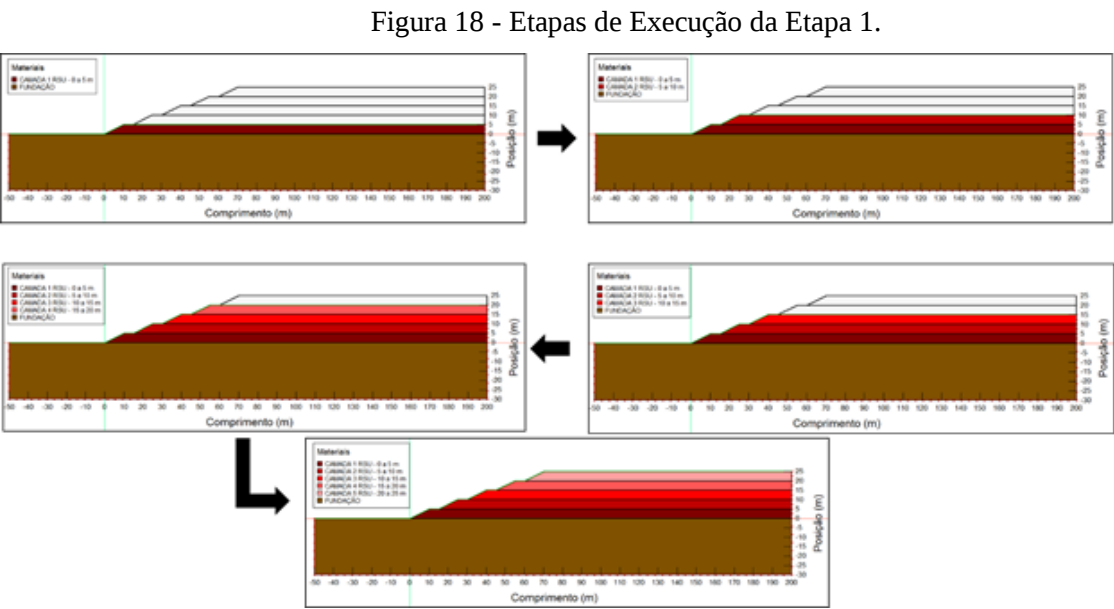
Figura 17 - Geometria considerada para o Aterro Sanitário de Brasília Etapa 1.



Fonte: O Autor (2022).

Durante as análises adotou-se, como procedimento construtivo, elevações de 5m, caracterizando assim cinco etapas construtivas. A Figura 18 ilustra estas etapas, que foram compostas de uma camada de cinco metros, cada uma. Cada etapa foi analisada por meio do método de elementos finitos (utilizando-se o *software* Sigma/w), e as tensões obtidas após a execução de cada camada foram, então, transferidas para a análise de equilíbrio limite.

Cada camada foi executada em um período de 72 dias, com um tempo total de 360 dias.

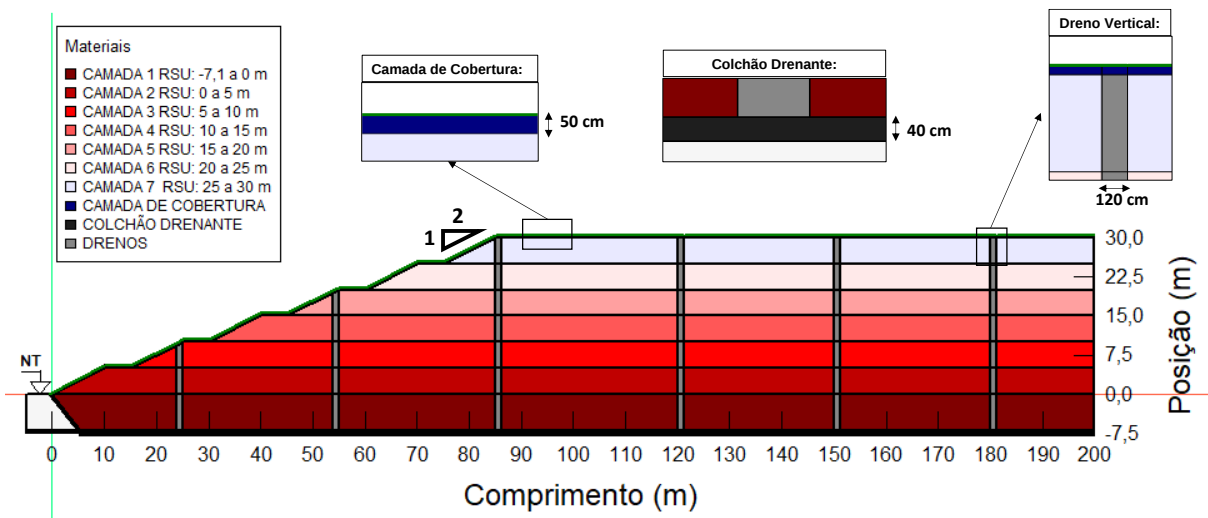


Fonte: O Autor (2022).

3.4.2.2 Etapa 2

Esta parte do aterro foi analisada com base nos dados de projetos apresentados no relatório CSA (2019). A Figura 19 ilustra as principais características geométricas utilizadas nas análises. O procedimento construtivo foi similar ao adotado para o caso anterior, porém com 7 estágios. Neste caso, o sistema de drenagem foi discretizado e uma análise de fluxo foi feita para definir as possíveis condições de pressão interna ao longo do ano, considerando-se o clima local. Salienta-se que o maciço está posicionado dentro de uma escavação previamente realizada e que é protegida por manta de PEAD.

Figura 19 - Geometria da Etapa 2.



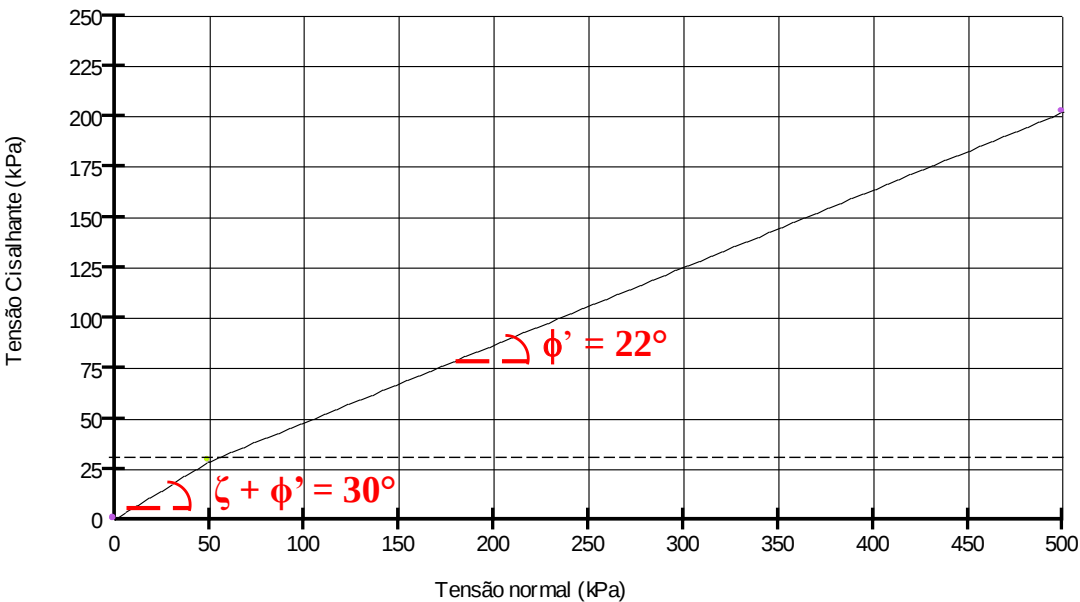
Fonte: O Autor (2022).

3.4.3 Parâmetros Geotécnicos dos Resíduos

3.4.3.1 Envoltória de ruptura

A envoltória de ruptura, adotada e definida na Figura 20, levou em conta que a mobilização inicial da resistência ocorre pela solicitação das fibras e a forma mais adequada de se traduzir isto para a envoltória de resistência de Mohr-Coulomb é por meio de uma envoltória bi-linear. Salienta-se que, em grande parte dos dados da literatura, as envoltórias são obtidas por meio de ensaios com níveis de tensão superior a 50kPa (MACHADO; KARIMPOUR-FARD, 2011; FUCALLE, 2005), desta forma é induzida a existência de uma coesão para baixas tensões. Contudo, a mobilização da resistência deve acontecer de forma lenta com base em uma mobilização das fibras (KÖLSCH, 1995). A Figura 20 ilustra a envoltória bi-linear adotada para as análises. Esta envoltória tomou como base os dados obtidos por Fucalle (2005), Keramati *et al.* (2020) e Shariatmadari *et al.* (2011), associados ao conceito proposto por Kölsch (1995).

Figura 20 - Envoltória de ruptura adotada para o resíduo.



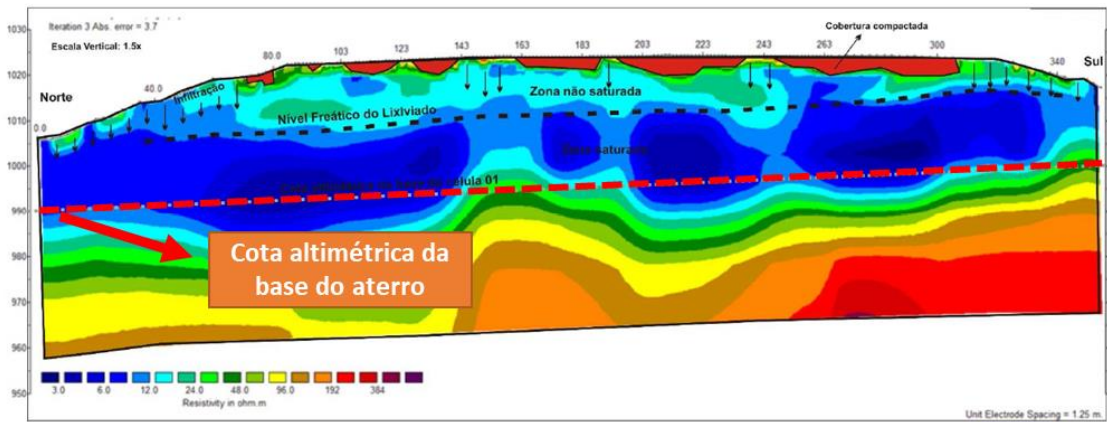
Fonte: O Autor (2022).

Dados apresentados por Shariatmadari *et al.* (2011) indicam que um material, com apenas fibra, teria um ângulo de atrito de aproximadamente 8°, valor compatível com o adotado para o valor de ζ . Como o valor do teor de fibras do aterro de Brasília é aproximadamente 45%, conforme Produto 1 desta consultoria para a ADASA, considera-se o valor de ζ , conservador e adequado. Além disto os autores indicam a envoltória curva, quando dados com baixas tensões são obtidos. Para resíduos jovens Keramati *et al.* (2020) confirmam os baixos valores de coesão quando os ensaios são realizados sob baixas tensões normais e que a coesão aumenta ao se considerar deformações maiores para definir a envoltória. Isto indica a mobilização das fibras.

3.4.3.2 Pressões dos poros para a Etapa 1

Para a retroanálise utilizou-se as observações de campo apresentadas nos relatórios da Adasa (2019), informações obtidas pelo perfil de tomografia elétrica (Cunha, 2020) na Etapa 1 do Aterro Sanitário de Brasília após 1 ano da ruptura e dados dos piezômetros instalados no aterro após a ruptura. Este conjunto de dados, embora não seja a exata condição das pressões de poros no momento da ruptura, orientou, de forma clara, qual seria a distribuição espacial no momento da ruptura. A Figura 21 ilustra a interpretação dos dados obtidos indicando a distribuição de umidade no interior do maciço, obtida por eletro resistividade.

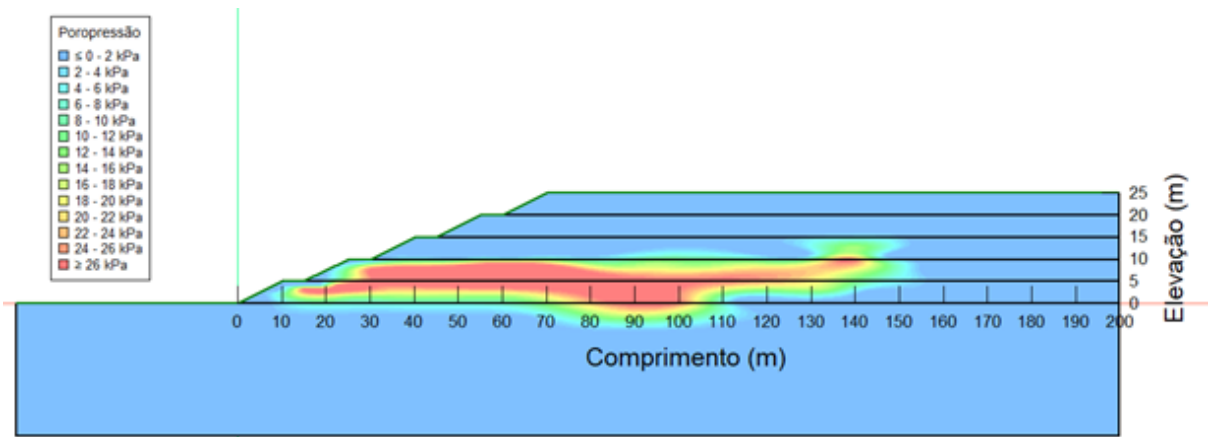
Figura 21 - Perfil Geoelétrico ASB, Etapa 1, interpretado segundo dados disponibilizados de Nível Freático e Cota altimétrica da base da Célula 01.



Fonte: Cunha; Borges (2020).

A Figura 22 ilustra a distribuição de poro-pressão adotada nas retroanálises que foi gerada por uma associação de fatores que envolvem: a obstrução do sistema de drenagem e precipitação pluviométrica. Pequenos ajustes foram feitos de modo a se obter um FS igual a 1.

Figura 22 - Região piezométrica adotada para retroanálise.



Fonte: O Autor (2022).

3.4.3.3 Peso específico dos resíduos

Com base no acompanhamento da execução do Aterro Sanitário de Brasília, durante o período entre janeiro de 2017 e junho de 2020, foi obtido o volume aterrado ($2.303.939,22\text{m}^3$) e a massa lançada ($2.205.130,98\text{T}$), desta forma, determinou-se o peso específico médio adotado nas análises para o resíduo. O valor utilizado foi de 9kN/m^3 . A Tabela 5 apresenta os valores adotados para os diversos materiais utilizados nas análises.

Tabela 5 - Valores de peso específico adotados.

Material	Peso Específico (kN/m³)
Aterro de RSU	9,6
Cobertura	14,0
Drenos	21,0
Fundação	20,0

Fonte: O Autor (2022).

3.4.3.4 Parâmetros de deformabilidade

O módulo de deformabilidade (E_d) adotado nas análises de tensão foi de 30MPa, baseado em dados obtidos por meio de ensaios sísmicos *cross-hoje*, determinados por Carvalho (1999) no do Aterro Sanitário Bandeirantes (São Paulo). A Tabela 6 apresenta os valores de módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson adotados para os diversos materiais.

Tabela 6 - Parâmetros de Módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson.

Materiais	E (MPa)	ν
Aterro	30	0,26
Cobertura	45	0,30
Drenos	47	0,33

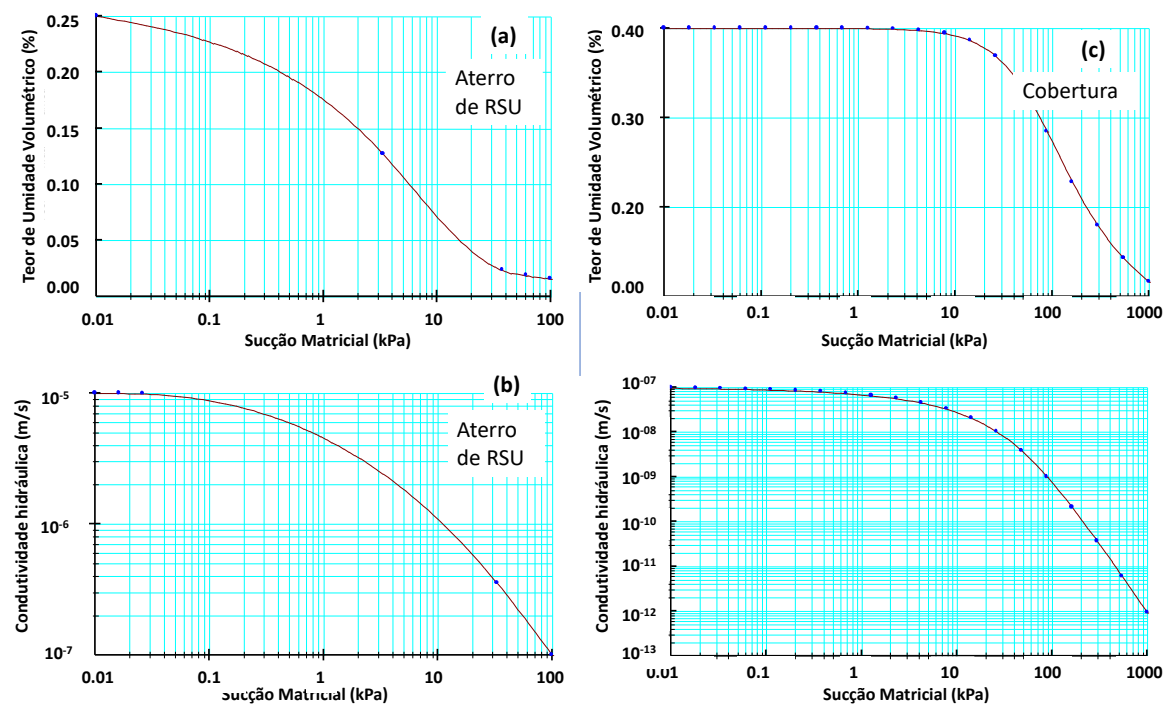
Fonte: Carvalho (1999).

3.4.3.5 Parâmetros hidráulicos

Nas análises da Etapa 2 foram realizadas análises de fluxo em meio não saturado. A função de permeabilidade adotada para o aterro utilizou dados criados com base em ensaios de campo e ajustados de forma que a curva passe por dois pontos conhecidos. O primeiro ponto é o coeficiente de condutividade hidráulica na condição saturada (K_{sat}). O segundo ponto do coeficiente de condutividade hidráulica foi obtido em ensaios de campo (MELO, 1998). A este ensaio foi associada a sucção da capacidade de campo (33 kPa).

As curvas de retenção e função de condutividade hidráulica utilizadas para o aterro de RSU e para a cobertura (considerada apenas nas análises da Etapa 2) estão apresentadas na Figura 23.

Figura 23 - Curvas de retenção e condutividade hidráulica (a) e (b) Aterro de RSU (c) e (d) cobertura do aterro



Fonte: O Autor (2022).

Na Tabela 7 estão apresentados os valores dos parâmetros utilizados para o modelo de Van Genuchten (1980) para o aterro de RSU e para a cobertura.

Tabela 7 - Parâmetros hidráulicos adotados para cobertura.	
Parâmetros	Cobertura
Ksat (m/s)	9,5508549e-08
θ_{sat} (%)	0,4
α	0,01
m	0,5
n	1,1

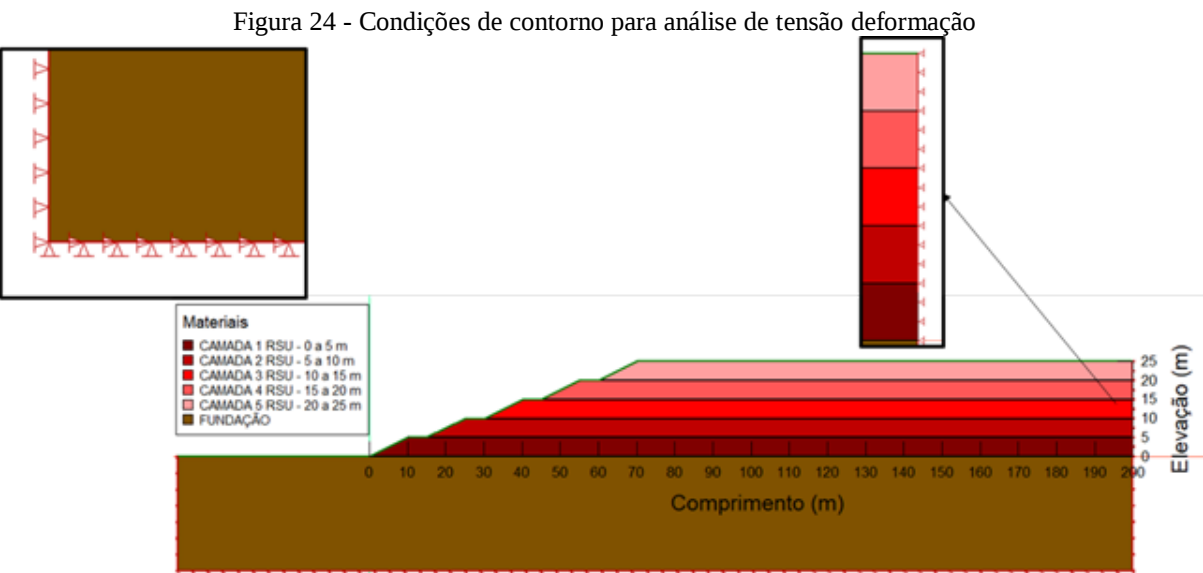
Fonte: Van Genuchten (1980).

3.4.4 Condições de contorno

3.4.4.1 Análise de tensão-deformação

A seção crítica adotada foi aquela onde ocorreram as maiores movimentações do aterro sanitário. Para realizar a análise de tensão-deformação algumas condições de contorno foram adotadas. No limite inferior do modelo, representando a fundação, utilizou-se um apoio de segundo gênero (sem possibilidade de movimentação em qualquer direção). Nas laterais utilizou-se um apoio de primeiro gênero (permitindo a movimentação apenas na direção

vertical). A Figura 24 ilustra as condições descritas. As análises foram realizadas utilizando-se o modelo linear elástico.



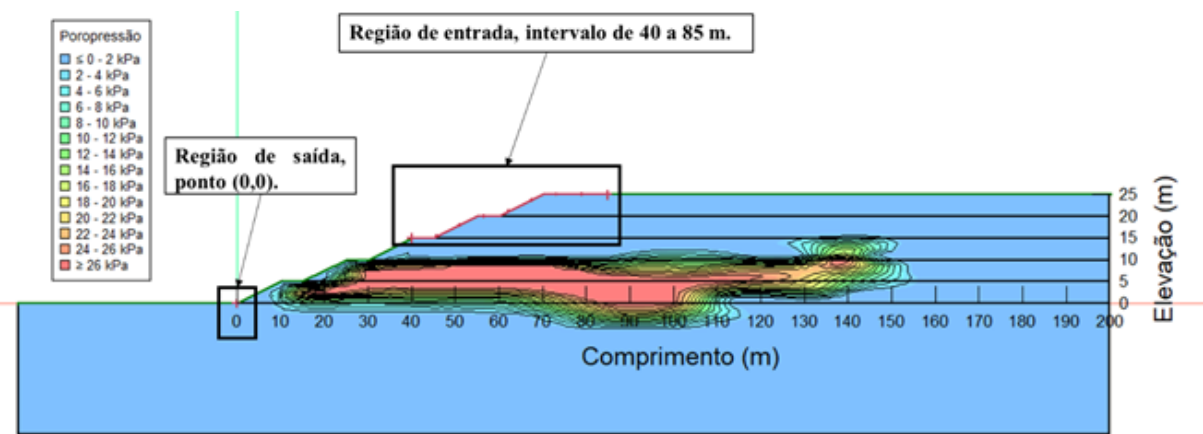
Fonte: O Autor (2022).

3.4.4.2 Análise por equilíbrio limite

As análises foram feitas em termos de tensões efetivas e utilizando as tensões advindas das análises tensão-deformação em cada etapa.

O procedimento para definição das pressões de poro foi apresentado nos itens anteriores. A Figura 25 apresenta a distribuição de poropressão adotada e as regiões de entrada e saída das superfícies de ruptura. Salienta-se que, embora a análise seja feita com um enfoque de retroanálise, permitiu-se a busca da superfície para as condições conhecidas, mantendo fixa saída na base.

Figura 25 - Distribuição de poro-pressão adotada e intervalo geométrico de variação da superfície analisados

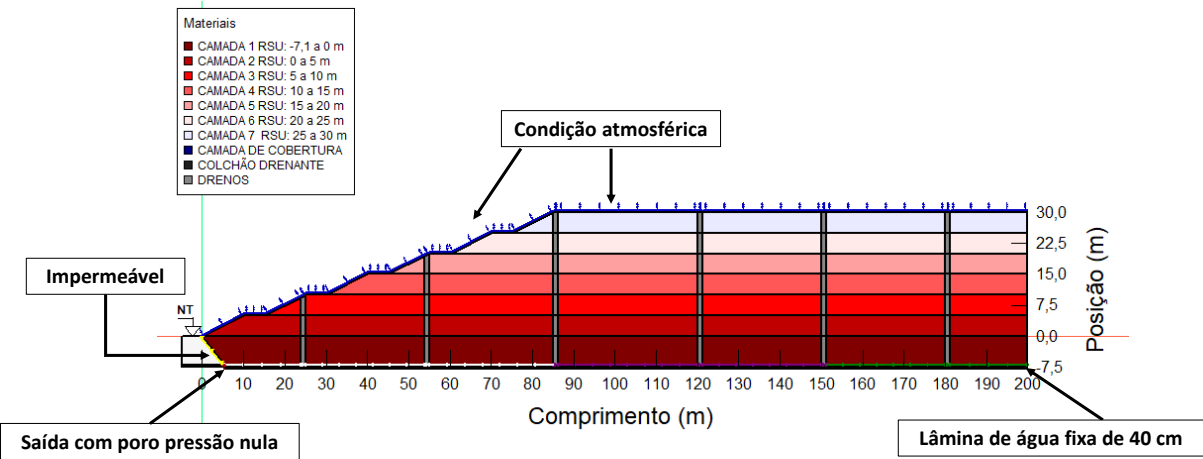


Fonte: O Autor (2022).

3.4.4.3 Condições de contorno da análise de fluxo da Etapa 2.

Para a análise de fluxo, realizada na Etapa 2, foram utilizadas as condições de contorno indicadas na Figura 26. As condições de carga no dreno procuram simular um dreno trabalhando com a carga piezométrica igual à altura do tapete na parte mais afastada do talude e que reduz até a saída no pé do talude, onde encontra uma saída que simula plena drenagem.

Figura 26 - Condições de contorno adotadas nas análises da Etapa 2.

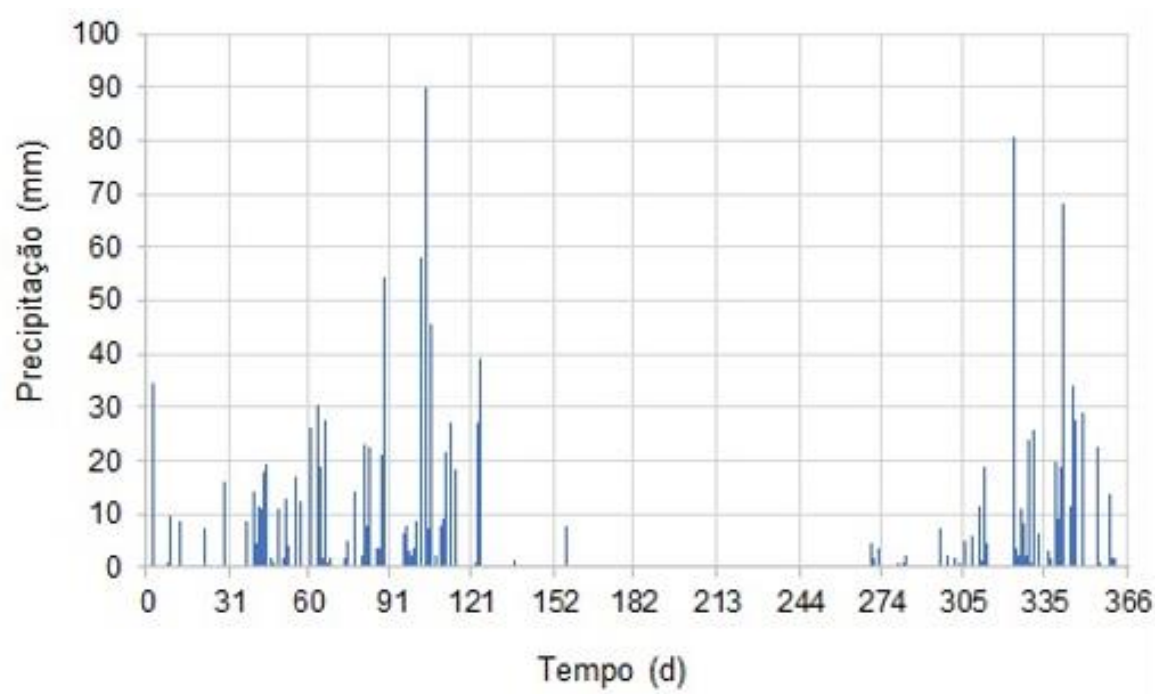


Fonte: O Autor (2022).

3.4.4.4 Poro-pressões na Etapa 2

Para as análises de estabilidade, da Etapa 2, foram realizadas análises de fluxo para estabelecer as variações de poropressões desenvolvidas e, depois, acopladas à análise por equilíbrio limite. As análises foram feitas considerando-se o tapete drenante com uma pressão de líquido igual a espessura do tapete, na sua parte mais distante da saída e reduzindo até a saída no pé do talude, como descrito anteriormente. Além disto, foi considerada, sobre o maciço, a condição climática da região, ilustrada na Figura 27. Esta distribuição de chuvas é a média dos valores obtidos entre 2017 e 2020. Esta distribuição de precipitação foi replicada por 10 anos para minimizar o efeito das condições iniciais nas análises.

Figura 27 - Distribuição pluviométrica adotada.



Fonte: INMET (2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 BIBLIOMETRIA

4.1.1 Busca na base de dados

A busca foi realizada no mês de junho de 2022, na base dados da Scopus, aplicando a metodologia PRISMA. Na primeira etapa, identificação, buscou-se simultaneamente as palavras-chave *slope stability*, *landfill and shear strength*, resultando na localização de 142 publicações. Depois, na segunda etapa, seleção, foram aplicados critérios de exclusão na amostra inicial por meio de filtros, ficando somente os artigos científicos de pesquisas, publicados em periódicos, entre os anos de 2022 e 2002. Com isso, a amostra foi reduzida para 75 artigos científicos.

Posteriormente, na terceira etapa, elegibilidade, foram realizadas as leituras dos títulos e dos resumos dos artigos selecionados na etapa anterior, resultando na inelegibilidade de artigos científicos, porque não tratavam das questões investigadas nesse estudo. Assim, prosseguiu-se com uma amostra de 53 artigos. Por fim, na quarta etapa, inclusão, foram lidos os artigos na íntegra, culminando na retirada de artigos, pois não estavam dentro do foco dessa pesquisa. Logo, incluiu-se 50 artigos científicos para análise da produção científica, exportando os dados bibliométricos desses artigos.

A diferença entre o número de documento localizados entre a fase de identificação até a fase inclusão aponta a relevância da metodologia inicial para análise de indicadores bibliométricos e cientométricos, pois permite uma sistematização que minimiza o surgimento de vieses na produção de revisões de literatura. Além disso, o método PRISMA permite maior velocidade na leitura, na análise e no processamento das informações existentes e da investigação do estado da arte dos trabalhos relacionados (Pacheco et al., 2018).

4.1.2 Evolução Temporal das Publicações

Ao analisar a evolução do número de publicações ao longo dos anos, nota-se que ela se mantém estável, com exceção dos últimos três anos que ocorre um crescente (Tabela 8). Assim, pode-se afirmar que essa área de estudo se encontra em evidência, sendo objeto de estudo de pesquisadores devido à possibilidade de descobertas científicas que contribuam para aplicação dessa tecnologia de destinação de resíduos sólidos. O número de trabalhos referentes

aos anos de 2020, 2021 e 2022 teve uma maior contribuição. Já nos anos de 2005 e 2007, foram o que tiveram não tiveram nenhum artigo científico encontrado sobre Estabilidade de taludes.

Tabela 8 - Evolução do número de publicações ao longo dos anos	
Ano	Artigos
2002	2
2006	2
2008	4
2009	2
2010	1
2011	4
2012	3
2013	1
2014	3
2015	3
2016	2
2017	3
2018	1
2019	2
2020	4
2021	8
2022	5

Fonte: O Autor (2022).

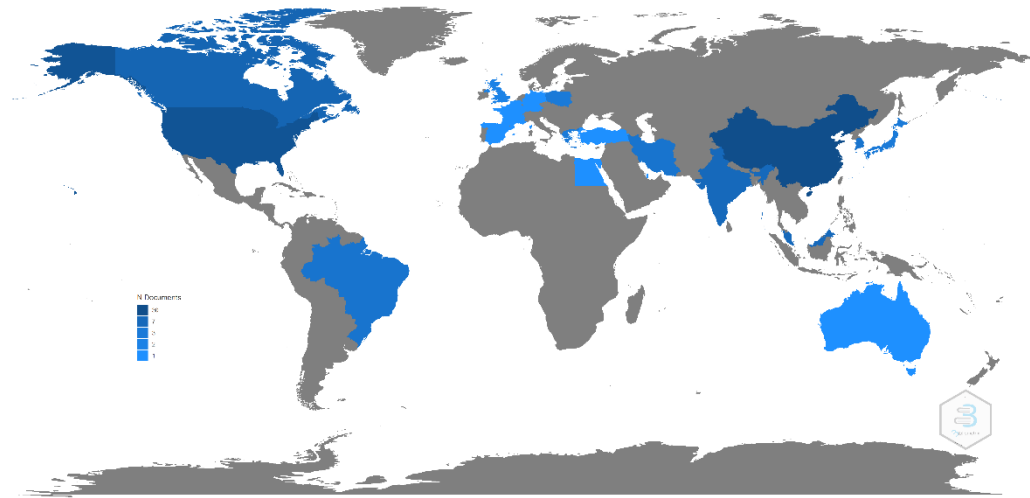
A média de publicações anuais foi igual a, aproximadamente, 3, logo, nota-se que os anos de 2020, 2021 e 2022 tiveram uma quantidade acima da média, provocando uma acentuação do crescimento da linha correspondente ao número acumulado de artigos publicados. Com isso, pode-se prever que o número de publicações relacionadas a esta área de estudo tenderá a continuar crescendo com o desenvolvimento de novas pesquisas que comprovam a importância do estudo de Estabilidade de taludes.

4.1.3 Distribuição das publicações

Considerando os autores correspondentes dos 50 artigos, percebe-se que apenas 7 países possuem 2 ou mais publicações: China com 15, Estados Unidos com 8, Canadá, Brasil e

Iran com 3 e Malásia e Índia com 2, totalizando 36 artigos (Figura 28). Ainda considerando os 7 países que têm 2 ou mais publicações, nota-se que o continente asiático foi o que teve maior contribuição, com 22 publicações, seguido do continente americano, com 14 publicações. Os resultados obtidos se mostram coerente com a história, pois os asiáticos sempre foram um dos pioneiros nos estudos de resíduos sólidos, assim como na parte de estabilidade de taludes.

Figura 28 - Principais países com publicações na temática.



Fonte: O Autor (2022).

Ainda considerando os autores correspondentes dos artigos, tem-se que sete instituições possuem duas ou mais publicações (Tabela 9). A distribuição das instituições pelos continentes dos locais de estudo sugere um interesse global pelo assunto, principalmente de economias de maior renda e renda média, como China em destaque, Índia, Iran, Canadá e Malásia.

Tabela 9 - Principais instituições com publicações na temática.

INSTITUIÇÕES	PAÍS	ARTIGOS
Universidade de Hohai	China	6
Universidade de Zhejiang	China	4
Instituto de Tecnologia Indiano	Índia	2
Universidade de Ciência e Tecnologia do Iran	Iran	2
Universidade de Xanghai Jiao Tong	China	2
Universidade Técnica de Creta	Grécia	2
Universidade de Guelph	Canadá	2
Universidade de Malásia	Malásia	2
Universidade de Ciência e Tecnologia de Zhejiang	China	2

Fonte: O Autor (2022).

Os artigos estão distribuídos em 20 periódicos, Tabela 10, sendo mostradas as revistas que apresentam dois ou mais artigos tendo como destaque a Waste Management and Reserach com 6 artigos, as revistas Bulletin Of Engineering Geology And The Environment, Geotextiles And Geomembranes, Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering, Waste Management com 3 publicações cada uma e as demais com duas publicações.

Considerando o alto fator de impacto desses periódicos em destaque, tem-se que a maioria dos trabalhos analisados apresenta boa qualidade, uma vez que foram submetidos a rigorosos processos de avaliação para publicação em revistas conceituadas em relação às métricas de impacto.

Tabela 10 - Discriminação dos periódicos por total de publicações.	
FONTES	ARTIGOS
Waste Management and Research	6
Bulletin of Engineering Geology and the Environment	3
Geotextiles and Geomembranes	3
Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering	3
Waste management	3
Applied sciences (switzerland)	2
Electronic journal of geotechnical engineering	2
Engineering geology	2
Environmental science and pollution research	2
International journal of geosynthetics and ground engineering	2
Soils and Rocks	2

Fonte: O Autor (2022).

4.1.4 Frequência de palavras

Através da frequência de repetição das palavras dos documentos analisados foi gerada uma lista ordenada de termos predominantes. Nesta perspectiva, os termos que apresentaram maior ênfase na análise textual destacam-se na área central e apresentam maior tamanho (Figura 29). A maioria das palavras nos títulos dos artigos concentra-se em palavras relacionadas ao tema e ao contexto do estudo, sendo as principais: stability, landfill, waste, slope. Os termos mais frequentes na nuvem referente às palavras utilizadas nos resumos mostram uma ênfase nos métodos, destacando landfill, slope, shear strength, waste. Vale

salientar também que diante desse cenário, exemplifica-se o diferencial desse trabalho que combina os efeitos do clima e a análise da estabilidade por equilíbrio limite, como descrito no no item 4.4. Desse modo, a palavra clima não teve correlação com estabilidade de taludes e não estava na nuvem de palavras dos artigos analisados na bibliometria.

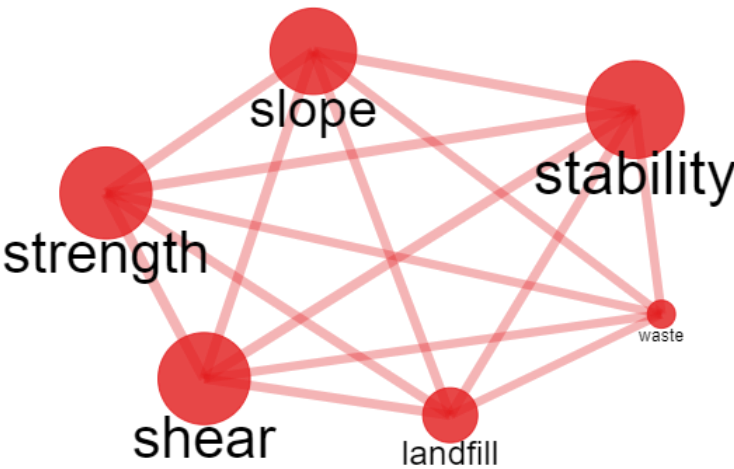
Figura 29 - Nuvem de palavras formadas a partir: (a) dos títulos; e, (b) dos resumos



Fonte: O Autor (2022).

Em relação à análise de redes por coocorrência de termos localizados nos títulos e nos resumos (Figura 30), observa-se que a sinergia entre as palavras ocorre em torno do termo stability, que possui interligação com todos demais vocábulos que tiveram maiores repetições. Ainda, percebe-se uma ligação mais forte da palavra stability com os termos slope, stability, strength demonstrando que as pesquisas tratam basicamente da análise de estabilidade utilizando parâmetros de resistência ao cisalhamento. Secundariamente, destacaram-se os vocábulos landfill e waste, formam o objeto de estudo dessa pesquisa, ocorrendo a análise de estabilidade de taludes em aterro de resíduos sólidos urbanos. Dessa forma, a identificação da coocorrência das palavras, reforçam os resultados dos filtros aplicados nas etapas de busca e seleção, pois esses termos possuem o mesmo conteúdo semântico, ou seja, relacionados com Estabilidade taludes em aterros sanitários.

Figura 30 - Rede de coocorrência de palavras.

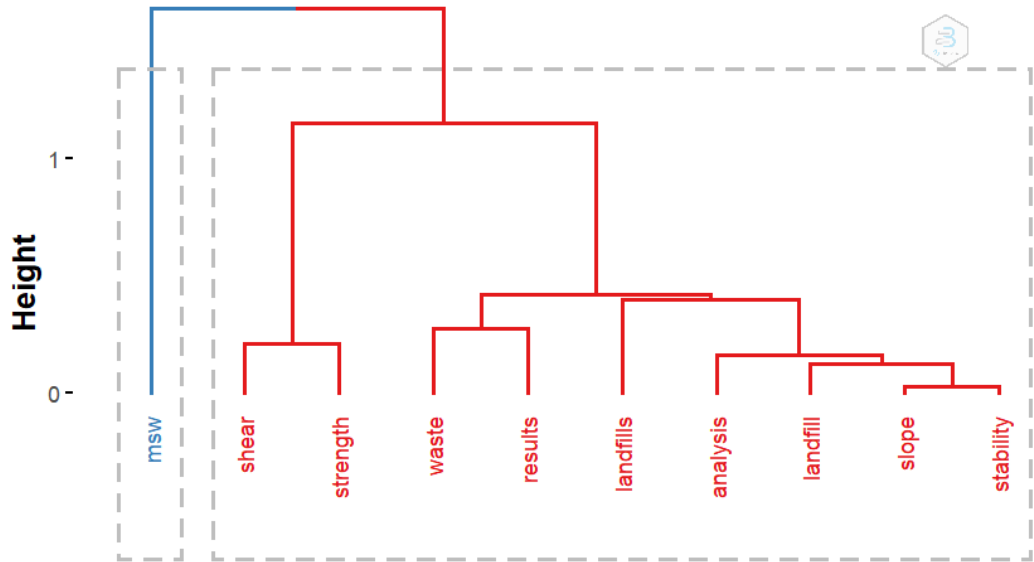


Fonte: O Autor (2022).

4.1.5 Análise Fatorial

Através da análise da matriz de coocorrências nas palavras dos resumos, observa-se pelo diagrama de árvore ou dendrograma, que exibe os grupos formados por agrupamento de observações em cada passo e em seus níveis de similaridade, como as palavras se correlacionam e formam fatores que pode determinar um campo de estudo (Figura 31). Para Hair, Black, Babin, Anderson e Tatham (2006), a análise fatorial é uma técnica de redução de dados que correlaciona itens a fatores.

Figura 31 - Análise do dendograma.



Fonte: O Autor (2022).

O dendograma foi utilizado para visualizar os nichos do processo e das análises dos níveis de distância dos clusters formados. Seguindo a análise é possível observar dois clusters. O primeiro está caracterizado pelo termo MSW em português RSU, Resíduos Sólidos Urbanos que é o material disposto no aterro e, portanto, fator importante a ser estudado, já que sua tipologia interfere tanto na estrutura e tempo de vida útil do aterro. Já o segundo está relacionado a estudos geotécnicos, como estabilidade, resistência ao cisalhamento e ensaios em aterros sanitários, ou seja, temáticas relacionadas a engenharia. O nível de similaridade é medido ao longo do eixo vertical e as diferentes observações são listadas ao longo do eixo horizontal. Esses principais termos encontrados na análise fatorial são considerados variáveis latentes, que são aquelas que não são observadas no cotidiano, porém são importantes para implantação de um estudo ou modelo (Leme, Alves, Lemos, & Fattori, 2020).

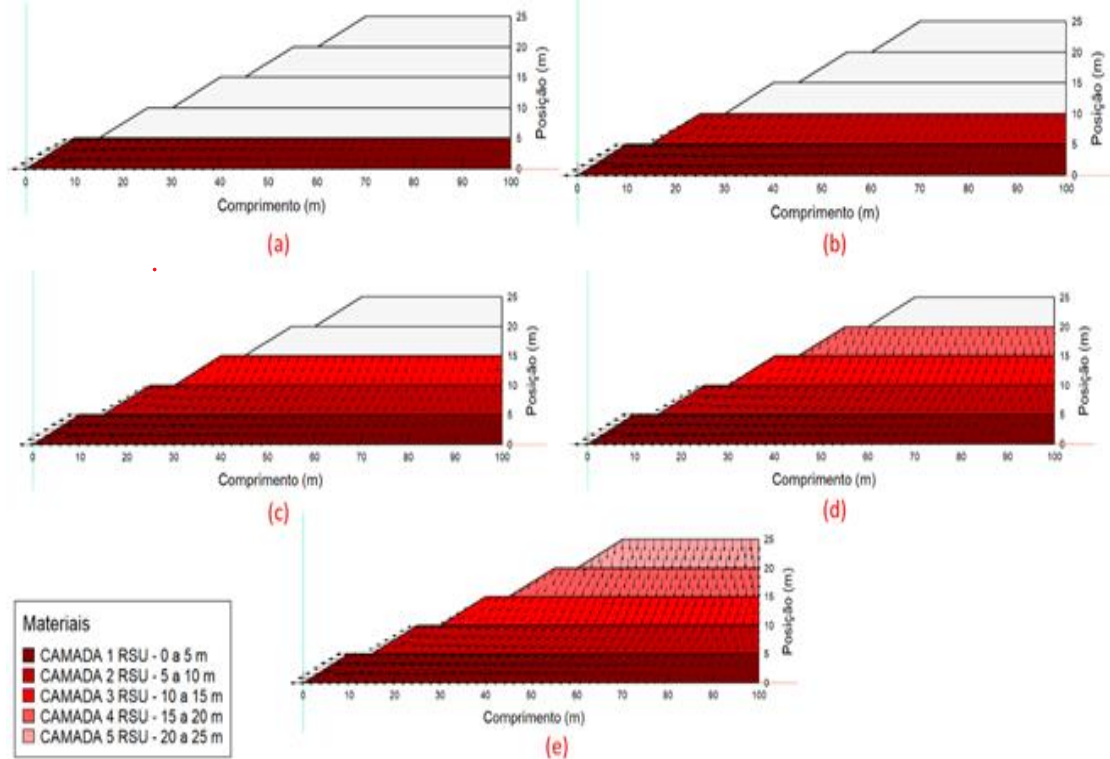
4.2 RETROANÁLISE DA MOVIMENTAÇÃO EXCESSIVA (ETAPA 1)

A retroanálise de estabilidade de talude do aterro de RSU foi realizada com objetivo de definir a distribuição de poropressão que levou à movimentação excessiva do maciço. Além disto, a análise incluiu, na envoltória adotada, o efeito das fibras como componente de reforço, como sugerido por Kölsch (1995). Este procedimento induz uma menor resistência para baixas tensões forçando a coesão nula.

Inicialmente a análise foi feita sem considerar a existência de poropressão e ao final considerando a sua presença e efeito. A seção crítica adotada foi modelada no SIGMA/W com

base nas informações coletadas em campo pelos relatórios da ADASA (2019). Para cada fase construtiva, utilizou-se as tensões obtidas nas análises por equilíbrio limite. A Figura 32 apresenta os vetores de deslocamentos, ou seja, a trajetória dos deslocamentos, permitindo assim avaliar a tendência da movimentação durante a construção.

Figura 32 - Vetores de deslocamento ao longo do alteamento das camadas.

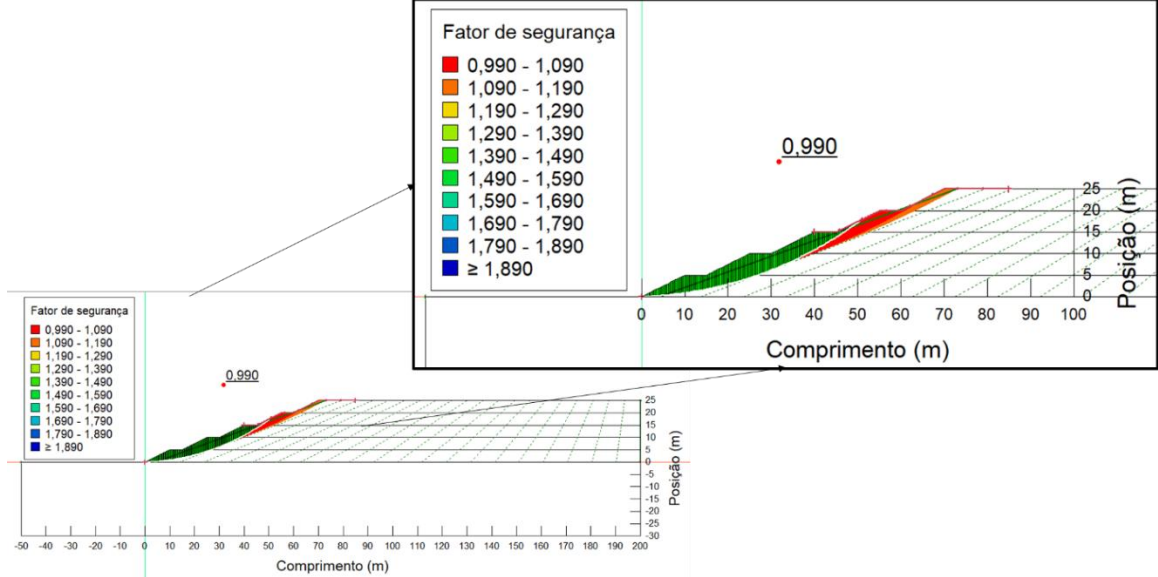


Fonte: O Autor (2022).

Observa-se que, ao longo do processo construtivo, os vetores de deslocamentos se encaminham para esquerda em direção ao pé do talude.

A Figura 33 apresenta o resultado da análise de estabilidade obtido com os parâmetros de resistência apresentados no item 3.4.3.1 e com a distribuição de poropressão das Figuras 24 e 23.

Figura 33 - Superfície de ruptura para um F.S. = 1.



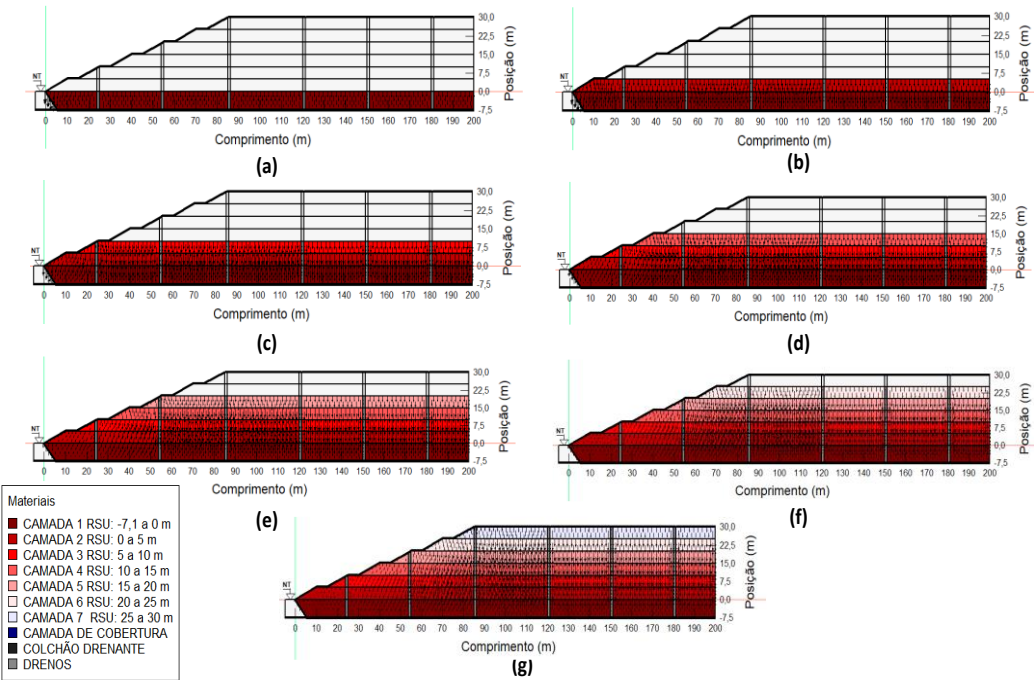
Fonte: O Autor (2022).

Quando não se leva em consideração a existência de poro-pressão o FS obtido é de 1,7, ou seja, manteve-se acima do mínimo ($FS_{min} = 1,5$) estabelecido por norma. Porém, quando se introduz as poropressões, interpretadas com base em dados e observações e distribuídas de modo semelhante ao detectado pela investigação de eletro resistividade, foi encontrado o fator de segurança que representa o deslocamento excessivo observado, ou seja, $FS = 1$.

4.3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA ETAPA 2

Na Figura 34 estão apresentados os vetores de deslocamentos de cada estágio da Etapa 2. Observa-se que a instrumentação de deslocamento horizontal não apresenta uma tendência clara de deslocamentos em direção ao talude. Este fato se deve à escavação para implantação do primeiro estágio. A escavação criou um confinamento da base das primeiras camadas do resíduo. Este confinamento reduziu o deslocamento horizontal na base do aterro. Salienta-se que esta análise tem aspecto qualitativo, pois não leva em conta a presença de poropressões.

Figura 34 - Vetores de deslocamento ao longo do alteamento das camadas

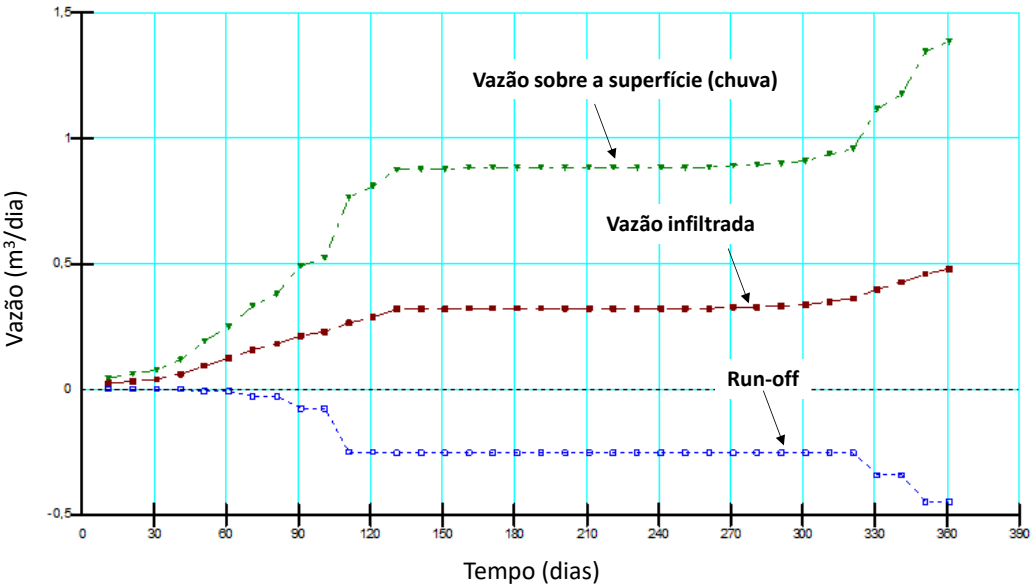


Fonte: O Autor (2022).

O fator de segurança na altura máxima, sem a presença de poro-pressões, foi de 1,7.

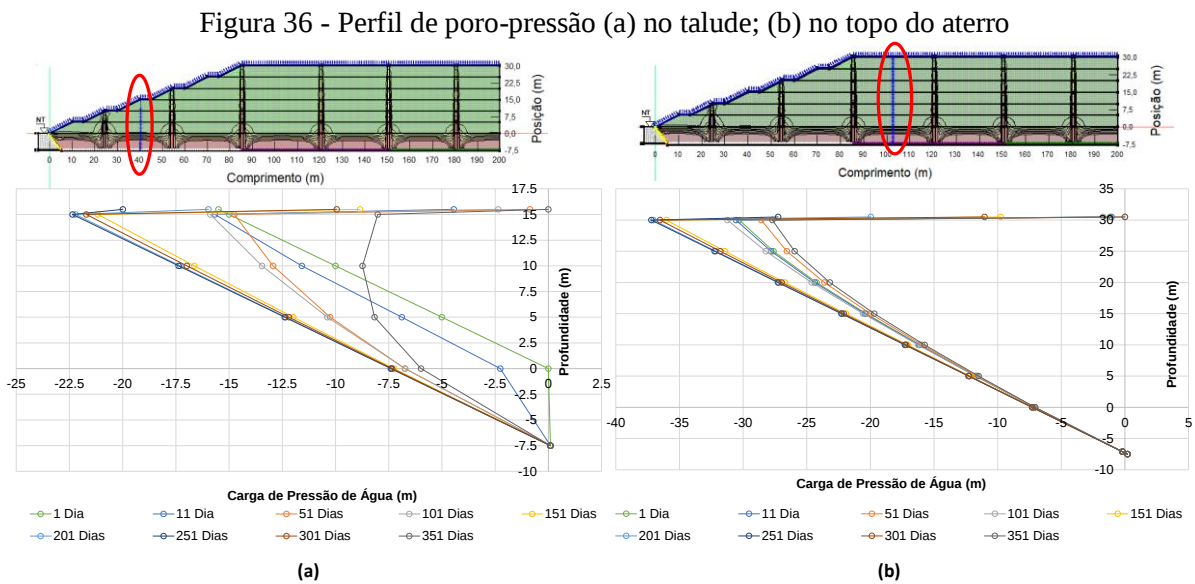
A análise de fluxo transiente permitiu avaliar as vazões, fruto das precipitações e, separar a parte infiltrada e a escoada (*run-off*). Na Figura 35, apresentam-se as vazões obtidas ao longo do último ano da análise de 10 anos. Salienta-se que são vazões por metro de aterro. Considerando um perímetro de 700m tem-se infiltrações máximas da ordem de 350m³/dia.

Figura 35 - Precipitação e vazões no aterro.



Fonte: O Autor (2022).

Na Figura 36 estão apresentados dois perfis de poropressão obtidos ao longo de um ano. Salienta-se que a análise foi feita com os dados meteorológicos de Brasília e mantidos por 10 anos, de modo a minimizar o efeito da condição inicial adotada. Na Figura 36a, observa-se o perfil mais próximo ao pé do talude e na Figura 36b, observa-se um perfil no topo do aterro.

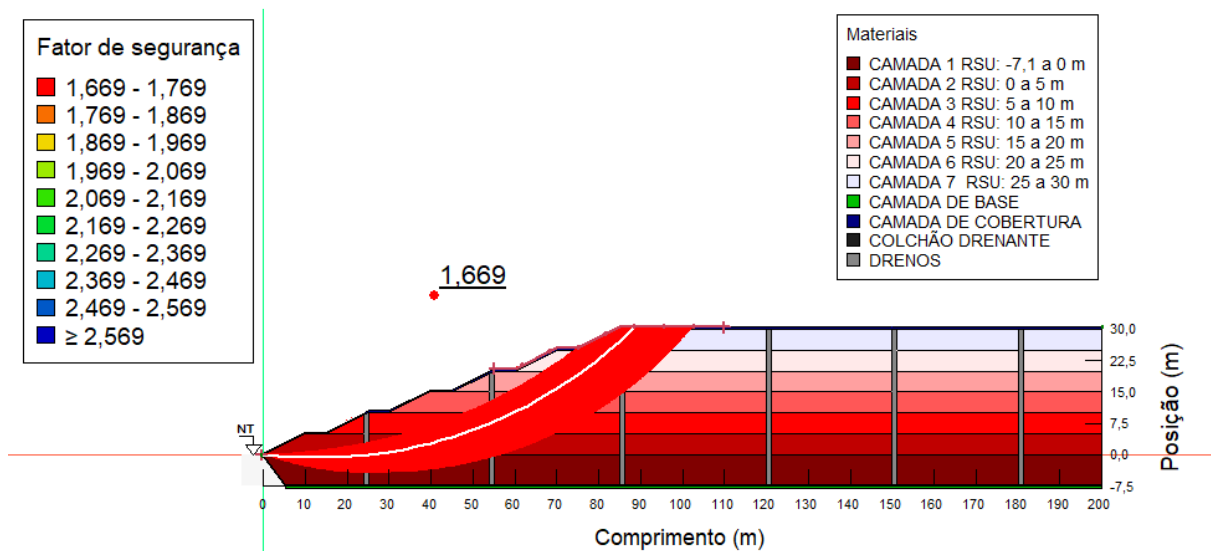


Fonte: O Autor (2022).

O efeito da precipitação é maior no perfil do talude, apresentado na Figura 37a, que apresenta uma maior redução da sucção. A poro-pressão torna-se zero na superfície e na base do aterro. Na base, isto ocorreu no mês de janeiro, logo após um período chuvoso. Já, na parte superior do aterro, as poro-pressões permanecem baixas ao longo do ano. Estes resultados indicam que se o sistema de drenagem funcionar adequadamente não haverá desenvolvimento de pressões de água que prejudiquem o talude. Precipitações mais intensas não foram analisadas.

A Figura 37 apresenta a superfície crítica obtida que possui um fator de segurança de 1,7. A análise de estabilidade foi feita utilizando-se as condições de fluxo obtidas na análise transiente para todo o ano, no último ano da análise de 10 anos de chuva. Observou-se que o F.S. não foi afetado pelas precipitações ao longo do ano. Existem duas razões para isto. A primeira é que a análise não considerou ganho de resistência devido a sucção, já que o papel da sucção neste tipo de material é muito pequeno; a segunda razão é porque não houve geração de poro-pressão positiva ao longo da análise para a chuva adotada.

Figura 37 - Superfície crítica da Etapa 2.



Fonte: O Autor (2022).

4.4 O CLIMA LOCAL E A VARIAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA

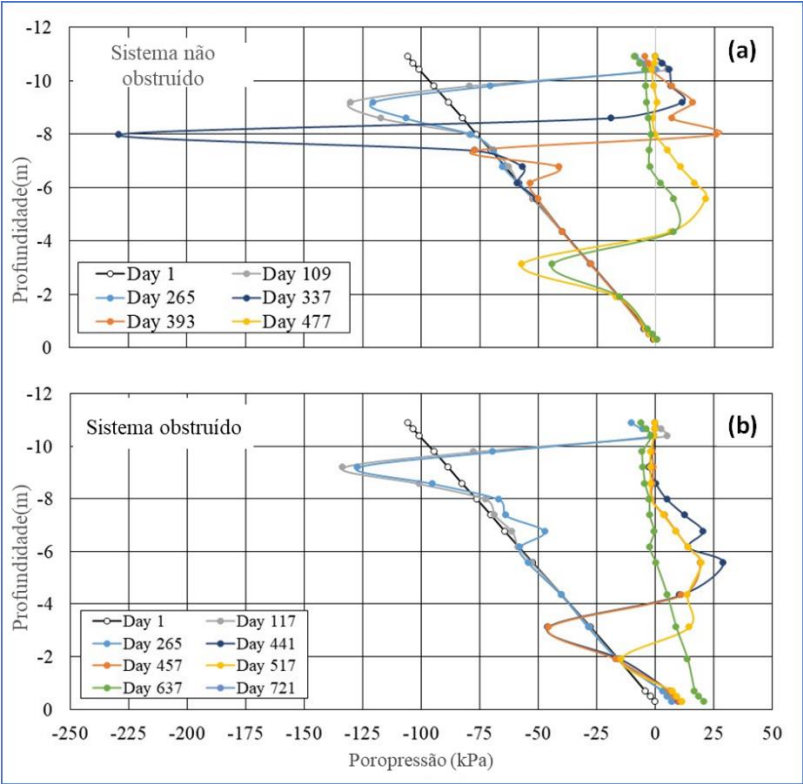
Para melhor identificar as razões do aumento da poro-pressão o que causou a movimentação, foi realizada uma análise combinando os efeitos do clima e a análise da estabilidade por equilíbrio limite. Foram estabelecidas as condições climáticas do local onde está localizado o aterro sanitário, adotando dados de precipitação. Considerando a localização do aterro, o modelo de Penman-Monteith foi usado para levar em consideração a evaporação. O estudo replicou a condição climática por dois anos, sendo a condição inicial de poro-pressão a situação de equilíbrio a partir da base do aterro. Nas análises transitórias, o aterro é insaturado e, portanto, com alta permeabilidade a gases. Assim, a pressão do gás não foi considerada nas análises.

O projeto original do aterro adotou um dreno em espinha de peixe na base do aterro. Este sistema, quando comprometido devido a algum tipo de entupimento, gera um rápido aumento da poro-pressão. Como os aterros, em geral, estão muito sujeitos a processos químicos que podem acelerar o entupimento, recomenda-se o uso de mantas horizontais. A análise realizada no presente estudo é em duas dimensões, portanto, só é possível considerar as obstruções em um trecho. Assim, foram realizadas apenas duas análises: uma com dreno obstruído (caso 1) e outra sem obstrução (caso 2). As análises foram feitas considerando a manta horizontal com 0,40 m de altura e adotando uma permeabilidade saturada de 10^{-3} m/s.

No caso 1, a condição de contorno adotada induziu a plena eficiência do sistema de drenagem, durante os 2 anos de análise. Para o caso 2, foi considerada uma condição de obstrução variável ao longo do sistema de drenagem, simulando o processo de entupimento ocorrido no campo. A obstrução foi induzida a mais de 30 m da saída do dreno. A condutividade hidráulica ao longo do trecho considerado obstruído variou de 10^{-8} m/s a 10^{-10} m/s, sendo a obstrução considerada de forma regressiva, sendo a maior obstrução no ponto de saída da drenagem do aterro (10^{-10} m/s) e reduzindo para (10^{-8} m/s) a 30 metros da saída do lixiviado. Usando o software Seep/w (vazão insaturada considerando o clima local por dois anos) e Slope/w (análise de equilíbrio limite), as análises foram realizadas para o caso 1 e 2.

A Figura 38 mostra os perfis de sucção ao longo dos dois anos de análise, para o caso do dreno desobstruído (Fig. 38a) e para o caso do dreno obstruído (Fig. 38b). Ressalta-se que para os 4 m inferiores do perfil, trecho mais próximo ao sistema de drenagem, há um aumento da pressão do líquido intersticial quando o dreno tem sua drenagem limitada pela obstrução. Embora esse fenômeno (aumento da pressão intersticial) não ocorra no primeiro ano, o aumento da pressão líquida na base do aterro é claro no segundo ano. Deve-se notar que este foi o tempo decorrido entre a conclusão do aterro e seu rompimento.

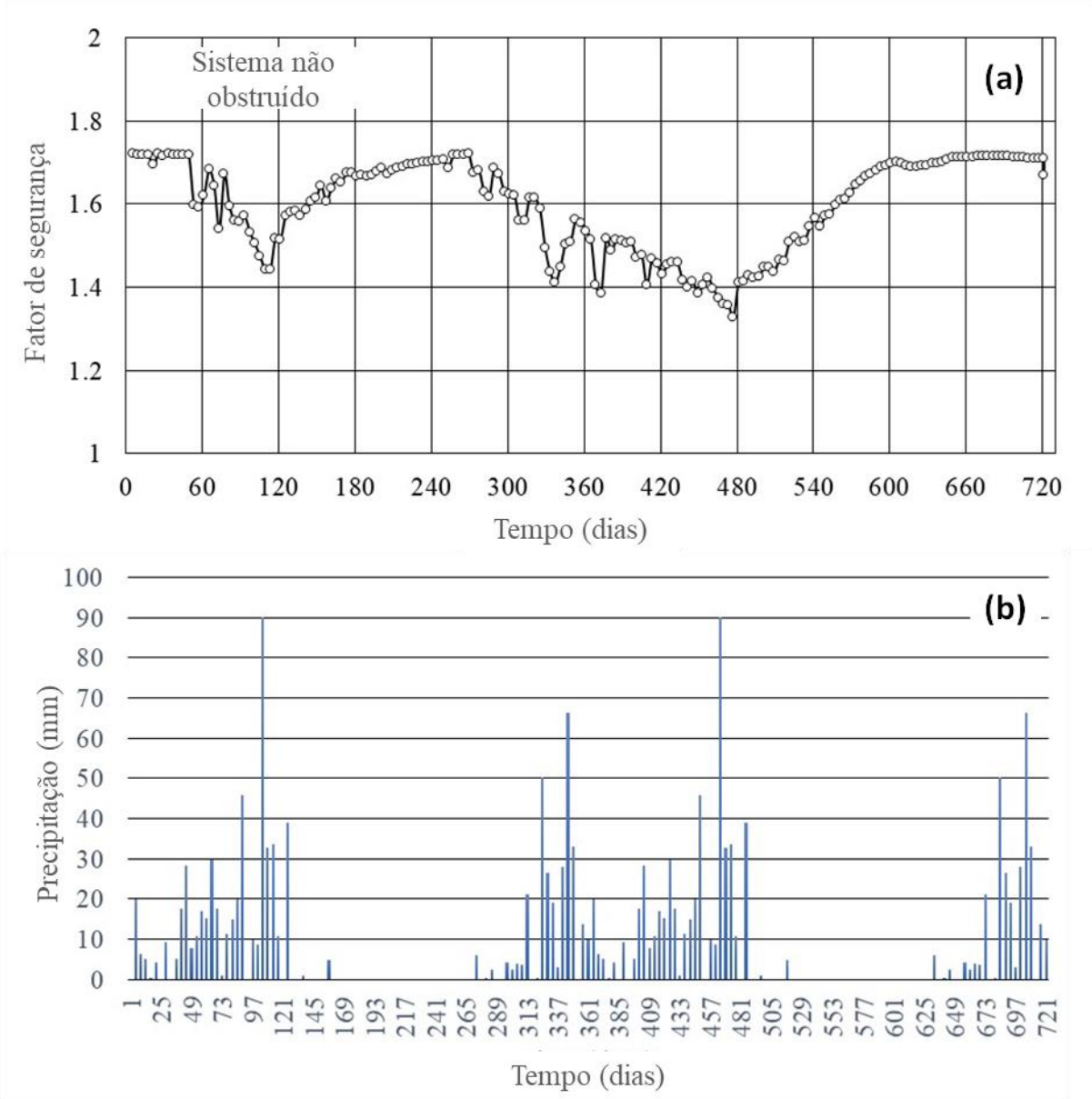
Figura 38 - Perfis de poro-pressão de líquidos para o (a) Dreno não obstruído (b) Dreno obstruído



Fonte: O Autor (2022).

Ao incorporar os perfis de poro-pressão de líquidos ao longo do tempo na análise de estabilidade, há uma variação esperada no fator de segurança. Essa variação está ligada à precipitação e à evaporação, ou seja, ao balanço hídrico local e à eficiência do sistema de drenagem. As Figuras 39 e 40 mostram a variação do FS ao longo do tempo, juntamente com a precipitação adotada. Em ambos os casos, a resposta do FS à precipitação é clara. Na situação do sistema sem obstrução, o FS atinge um valor abaixo de 1,4, mas ao final do segundo ano ainda mantém um FS acima de 1,7.

Figura 39 - Variação do Fator de Segurança para o sistema não obstruído com o tempo com a precipitação aplicada ao modelo

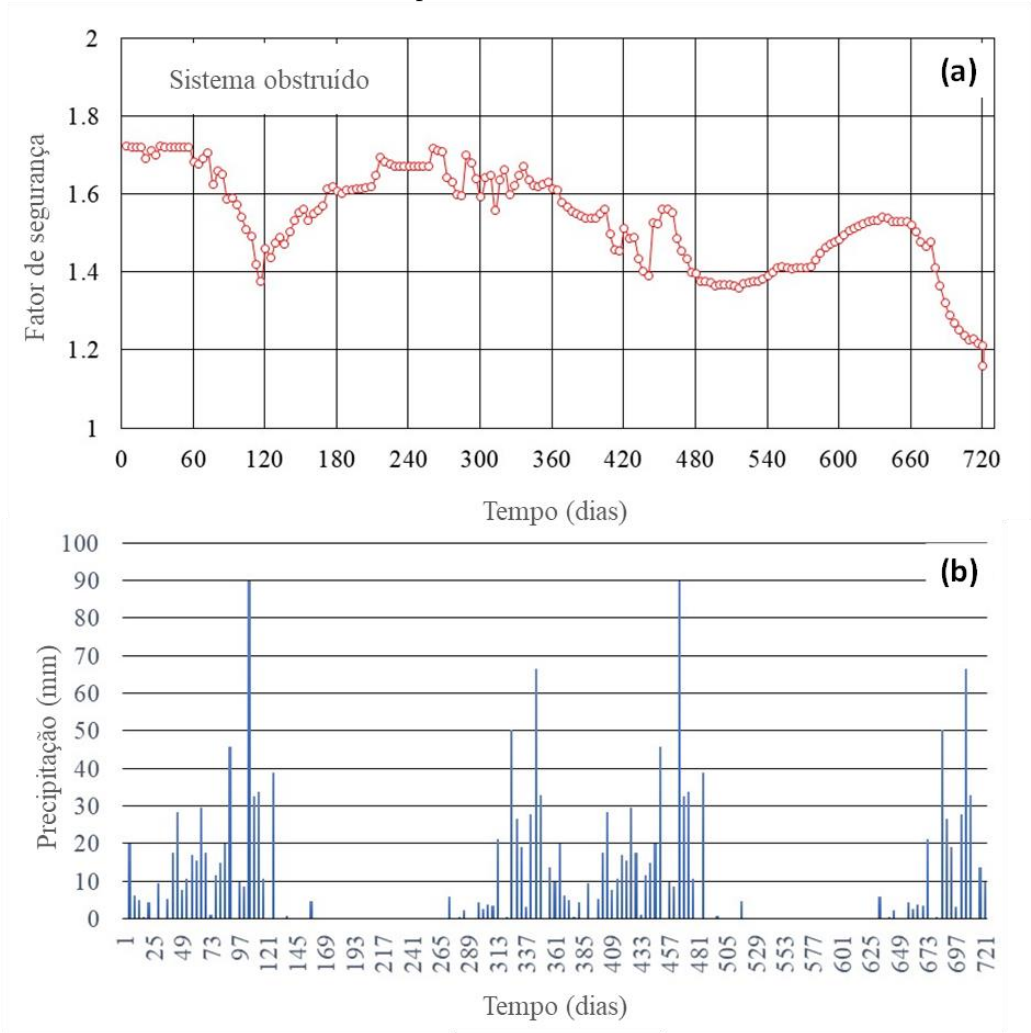


Fonte: O Autor (2022).

No caso em que o sistema sofre o processo de obstrução, Figura 40, o FS já atinge um valor abaixo de 1,4 no primeiro ano, e esse valor sofre uma redução a partir da segunda

estação chuvosa, atingindo valores abaixo de 1,2. Vale ressaltar que pode ter acontecido um acréscimo no NA que quando aumentado provoca redução no FS, tal comportamento foi também verificado por Giri e Reddy (2014) e Byun et al. (2019) quando analisaram a injeção do lixiviado no comportamento da estabilidade de taludes de aterros de RSU. Para Jahanfar et al. (2017), que estudaram aterros sanitários e vazadouros, em que a geração de poro-pressão também apresentou influência significativa no fator de segurança. Rocha et al. (2019) observaram uma redução do FS no Aterro Sanitário de João Pessoa com aumento do nível de lixiviado. Yamawaki et al. (2017) afirmam que o teor de umidade do material e/ou o aumento do nível piezométrico do aterro sanitário pode ocasionar um menor FS.

Figura 40 - Variação do Fator de Segurança para o sistema obstruído com o tempo com a precipitação aplicada ao modelo



Fonte: O Autor (2022).

Segundo Sheng et al. (2021), a expansão vertical de um aterro sanitário depende do nível de lixiviado existente no aterro. Os autores relatam que é difícil administrar a drenagem de lixiviado apenas pelo sistema de drenagem no fundo de um aterro, principalmente para

aterros com alto teor de matéria orgânica. Para minimizar o nível de lixiviado, as drenagens podem ser realizadas no decorrer do aterro, possibilitando dessa forma a expansão do Aterro Sanitário. As instalações de drenagem de lixiviado geralmente utilizadas contém, principalmente, poços verticais (KE et al., 2018) e trincheiras horizontais (YE et al., 2016).

Koerner e Soong (2000) analisaram 10 deslizamentos em aterros nos EUA usando o método simplificado de Bishop e o método simplificado de Janbu. Os resultados mostraram que a carga de lixiviado alta foi a principal razão para a instabilidade do aterro. Um alto nível de lixiviado no aterro causou sete falhas; as três falhas restantes foram relacionadas a chuvas fortes.

Em virtude da incerteza das propriedades dos resíduos, são encontradas muitas dificuldades e desafios na seleção dos valores adequados para uso no projeto de aterros sanitários. As problemáticas se devem à heterogeneidade dos resíduos, método empregado para coleta dos parâmetros de resistência e incompatibilidade de tensões entre os resíduos e seus materiais subjacentes (DE STEFANO et al., 2016; JAHANFAR et al., 2017). Os RSUs são um sistema de materiais heterogêneos que, mesmo quando em um aterro específico, suas fases e componentes são muito variáveis. (ARAÚJO NETO, 2021).

5 CONCLUSÕES

A pesquisa proporcionou observar o cenário das produções científicas ao longo de 20 anos sobre a estabilidade de taludes em aterros sanitários, baseando-se por análises de indicadores cientométricos e bibliométricos. Os 50 artigos analisados indicaram que essa área de estudo se encontra em evidência, sendo objeto de estudo de pesquisadores devido a possibilidade de descobertas científicas que contribuam para aplicação da tecnologia. As nações mais produtivas foram as do continente asiático e americano, destacando-se a China e os Estados Unidos.

A retroanálise da Etapa 1 foi feita utilizando o estado de tensão, devido à construção do aterro em termos de tensões efetivas, mas sem poro-pressão, e estes valores foram utilizados nas análises. Adotou-se uma envoltória bilinear que representa melhor o comportamento do maciço. Com estas definições foi obtida a distribuição de poro-pressão que leva o aterro ao fator de segurança igual a 1. A distribuição obtida está de acordo com o que foi observado no período da movimentação excessiva e com os dados de eletro resistividade. Desta forma, conclui-se que a razão da movimentação foi o mal funcionamento do sistema de drenagem que acumulou, tanto água da chuva quanto chorume, levando ao aumento da poro-pressão para níveis maiores do que o previsto em projeto.

Na Etapa 2, o estudo levou em conta a construção em etapas, realizando as análises em termos de tensões efetivas, mas sem poro-pressões durante a execução. Só foi analisada a situação final do aterro, com altura de 37,5m. A análise de fluxo transiente, levando em conta a precipitação anual, indicou que não há geração de poro-pressão positiva no aterro, embora ela chegue a zero em alguns períodos do ano. Este aspecto deve ser melhor analisado utilizando-se precipitações mais críticas.

A análise de estabilidade da Etapa 2 foi feita utilizando-se os perfis ao longo do último ano da análise de 10 anos e indicou que não há variação do fator de segurança. Salienta-se que a condição de contorno imposta para o tapete garante plena eficiência com uma carga igual à espessura na parte mais distante do tapete. Situações mais críticas devem ser analisadas. Com base nos estudos realizados conclui-se que o F.S. da Etapa 2, para às condições adotadas, é de 1,7, sem alteração ao longo do ano.

Os sistemas de drenagem em forma de espinha de peixe têm sérias limitações em sua eficiência. Esse efeito é acentuado devido às condições climáticas, ao sistema de cobertura e à operação do aterro. Na maioria dos casos, um sistema de manta de drenagem é mais eficaz. Em um sistema com manta horizontal, a eventual obstrução ainda permite a drenagem por outro trecho, por isso considera-se mais seguro adotar esse tipo de sistema.

REFERÊNCIAS

- ABREU, A. E. S. de. **Investigação geofísica e resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos de diferentes idades**. 2015. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- ABREU, A. E. S.; VILAR, O. M. Influence of composition and degradation on the shear strength of municipal solid waste. **Waste Management**, v. 68, p. 263-274, 2017.
- ADASA **Relatório de Fiscalização**. Agência Reguladora de Água, energia e saneamento básico do Distrito Federal - SEI/GDF – 17891370, 2019.
- ADASA (2019) - Relatório de Fiscalização Agência Reguladora de Água, energia e saneamento básico do Distrito Federal - Relatório SEI-GDF n.º 1/2019 - SLU/PRESI/DILUR/GERAT/NUASA.
- ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. 2007. 364f. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife.
- ALI, L.; ALI, S. & MAQBOOL, A. (2009). Large Direct Shear Test Apparatus for In Situ Testing of Municipal Solid Waste Landfill Sites. **GeoHunan International Conference**, Changsha, Hunan, August, 2009.
- ARAÚJO NETO, C. L.; GURJAO, R. I. L.; SILVA, J. H. G.; OLIVEIRA, J. K. L.; TRINDADE, J. R.; PAIVA, W. Análise dos deslocamentos verticais ocorridos em um aterro sanitário em fase de operação. In: FÓRUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 10, 2019. João Pessoa. **Anais [...]**. 2019.
- ARAÚJO NETO, C. L. DE. **Modelagem da resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos para análises da estabilidade de taludes de aterros sanitários**. 2021. 295 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3080**: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682**: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- AYUBA, K. A.; MANAF, L. A.; SABRINA, A. H.; AZMIN, S. W. N. Current Status of Municipal Solid Waste Management Practise in FCT Abuja. **Research Journal of Environmental and Earth Sciences**, v. 5, n. 6, p. 295-304, 20 jun. 2013.
- BAREITHER, C. A., BENSON, C. H., & EDIL, T. B. Effects of Waste Composition and Decomposition on the Shear Strength of Municipal Solid Waste. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.138, n.10, p. 1161–1174. 2012.
- BENVENUTO C. Fluxo de resíduos sólidos domiciliares em aterros sanitários no Brasil. **Revista de Limpeza Pública**, n. 93, p. 28-42. 2016.

BORGATTO, A. V. A. **Estudo das propriedades geomecânicas de resíduos sólidos urbanos pré-tratados**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano nacional de resíduos sólidos**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2012. 109p.

BYUN, B.; KIM, I.; KIM, G.; EUN, J.; LEE, J. Stability of bioreactor landfills with leachate injection configuration and landfill material condition. **Computers and Geotechnics**, v.108, p. 234-243, 2019.

CAMPI, T. M. O. **Estimativa dos parâmetros de resistência ao cisalhamento e do módulo de elasticidade dos resíduos sólidos urbanos utilizando resultados de ensaios de placa em aterro sanitário**. 2011. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, São Paulo, 2011.

CALLE, J. A. C. **Comportamento geomecânico de resíduos sólidos urbanos**. 2007. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

CARDIM, R. D. **Estudo da resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

CARVALHO, M. D. F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. 1999. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

CORREA, C. L. **Estudo das propriedades mecânicas dos resíduos sólidos urbanos**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

CUNHA, S. L. & BORGES, W. R. (2020) **Relatório ASB 01/2020** – Perfil de Tomografia Elétrica adquirido no topo da Célula 01 do Aterro Sanitário de Brasília em 21/01/2020. Instituto de Geologia da UnB.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo. Cengage Learning, 2007. 612 p

DE STEFANO, Matteo et al. Berm design to reduce risks of catastrophic slope failures at solid waste disposal sites. **Waste Management & Research**, v. 34, n. 11, p. 1117-1125, 2016.

DE PAULA, R. S. P.; SHIMODA, E.; BATISTA, F. B.; SANTOS JÚNIOR, P. J. Indicadores bibliométricos na base scopus: Uma análise das publicações sobre o tema “economia ambiental”. **Brazilian Journal of Development**, v. 3, p. 350-365, 2017.

DGGT. (1997). **DGGT** (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik) Empfehlungen zur 176 geotechnischen Erkundung des Untergrundes und des Abfallkörpers. E 1 - 7: Identifizierung von Abfällen und Stoffgruppen. Recuperado de <http://www.gdaonline.de/empfehlungen>

ELLEGAARD, O; WALLIN, J. A. The bibliometric analysis of scholarly production: How great is the impact? **Scientometrics**, v. 105, p. 1809-1831, 2015.

ENSSLIN, L.; DUTRA, A.; ENSSLIN, S. R.; CHAVES, L. C.; AND DEZEM, V. Research Process for Selecting a Theoretical Framework and Bibliometric Analysis of a Theme: Illustration for the Management of Customer Service in a Bank. **Modern Economy**, v. 6, p. 782–796, 2015.

FUCALE, S. P. **Influência dos componentes de reforço na resistência de resíduos sólidos urbanos**. 2005. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 166 p.

_____. **Estabilidade de taludes**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 192p.

GENG, S.; WANG, Y.; ZUO, J.; ZHOU, Z.; DU, H.; MAO, G. Building life cycle assessment research: A review by bibliometric analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.76, p.176 –184, 2017.

GONZALES, J. H. P. **Comportamiento geotecnico de vertederos controlados de residuos solidos urbanos**. Tese (Doutorado em Engenharia) Universidade da Cantábria, Espanha, 1995

GURJÃO, R. Í. L. **Influência da tensão normal aplicada, peso específico e umidade dos resíduos na resistência ao cisalhamento de resíduos urbanos aterrados**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.

HANSON, J. L.; YESILLER, N.; STOCKHAUSEN, S. A. V.; WONG, W. W. Compaction characteristics of municipal solid waste. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 136, n. 8, p. 1095-1102, 2010.

HAIR, J. F., BLACK, W. C; BABIN, B. J., ANDERSON, R. E., TATHAM, R. L. Multivariate Data Analysis. (6a ed.). **Upper Saddle River**, NJ: Pearson Prentice Hall, 2006.

HETTIARACHCHI, C. H.; MEEGODA, J. N.; TAVANTZIS, J.; HETTIARATCHI, P. Numerical model to predict settlements coupled with landfill gas pressure in bioreactor landfills. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 139, n. 3, p. 514-522, 2007.

HUANG, Y., & FAN, G. Engineering geological analysis of municipal solid waste landfill stability. **Natural Hazards**. v. 84, n.1, p.93–107, 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa**. Local: INMET, 2022.

JAIN, P.; POWELL, J.; TOWNSEND, T. G.; REINHART, D. R. Estimating the Hydraulic Conductivity of Landfilled Municipal Solid Waste Using the Borehole Permeameter Test. **Journal of Environmental Engineering**, v. 132, n.6, p. 645–652, 2006.

JAHANFAR, A. et al. Municipal Solid Waste Slope Stability Modeling: A Probabilistic Approach. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 143, n. 8, 2017.

JUCÁ, J. F.T.; NORBERTO, A. D. S.; SANTOS JÚNIOR, J. I. D.; MARINHO, F. A. Brasília municipal solid waste landfill: a case study on flow and slope stability. **Soils and Rocks**, v. 44, n.3, p. 1-13, 2021.

KE, H.; HU, J.; XU, X. B.; WANG, W. F.; CHEN, Y. M.; ZHAN, L. T. Evolution of saturated hydraulic conductivity with compression and degradation for municipal solid waste. **Waste Management**, v. 65, p. 63–74, 2017.

KERAMATI, M.; SHAHEDIFAR, M.; AMINFAR, M. H.; ALAGIPUOR, H. (2020). Evaluation the Shear Strength Behavior of aged MSW using Large Scale in Situ Direct Shear Test, a case of Tabriz Landfill. **International Journal of Civil Engineering**, v. 18, n.7, p. 717–733, 2020.

KOERNER, R. M.; SOONG, T. Y. (2000). Stability assessment of ten large landfill failures. Advances in transportation and geoenvironmental systems using geosynthetics. In: **Proceedings of sessions of GeoDenver 2000**, ASCE Geotechnical Special Publication No. 103: 1–38.

KÖLSCH, F. (1993). The Bearing Behaviour of Domestic Waste and Related Consequences for Stability. In: **4th International Landfill Symposium**, Cagliari (Italy) (Vol. 2, p. 1393–1410).

KÖLSCH, F. (1995). Material Values for Some Mechanical Properties of Domestic Waste. In: **5th International Landfill Symposium**, Cagliari (Italy) (Vol. 2, p. 711– 729).

KÖLSCH, F., 2010, **Geo-und Umwelttechnik**. Disponível em: <http://www.drkoelsch.de/html/biotreatment.html>.

KOLSCH, F.; FRICKE, K.; MAHLER, C.; DAMANHURI, E. Stability of landfills – The Bandung dumpsite disaster. In: **International Waste Management and Landfill Symposium**, 10., 2005, Sardinia. Proceedings [...]. Sardinia: 2005

KORFIATIS, G. P.; DEMETRACOPOULOS, A. C.; BOURODIMOS, E. L.; NAWY, E. G. Moisture transport in a solid waste column. **Journal of Environmental Engineering**, v.110, n.4, p.780–796, 1984.

LEME, D. E. C.; ALVES, E. V. C.; LEMOS, V. C. O.; FATTORI, A. Network analysis: a multivariate statistical approach for health science research. **Geriatr Gerontol Aging.**, v. 14, p. 43-51, 2020.

LIU, W.; WANG, J.; LI, C.; CHEN, B.; SUN, Y. sing Bibliometric Analysis to Understand the Recent Progress in Agroecosystem Services Research. **Ecological Economics**, v. 156, p.293-305, 2019.

MARTINS, H. L. **Avaliação da Resistência de Resíduos Sólidos Urbanos por Meio de Ensaio de Cisalhamento Direto em Equipamento de Grandes Dimensões**. 2006. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

MELCHIOR, C; ZANINI, R. R. Mortality per work accident: A literature mapping. **Safety Science**, v. 114, p. 72-78, 2019.

MERRY, S. M.; KAVAZANJIAN JR, E.; FRITZ, W. U. Reconnaissance of the July 10, 2000, Payatas landfill failure. **Journal of Performance of constructed Facilities**, v. 19, n. 2, p. 100- 107, 2005.

MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. G. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. **International Journal of Surgery**, v.8, p.336-341, 2010.

MOTTA, E. Q. DA. **Avaliação da resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos com co-disposição de lodo de tratamento de esgoto através de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

PACHECO, R. L.; SILVA, L. D. G. M. DA.; MELO, S. M. M. DE.; RIERA, R. Guidelines para publicação de estudos científicos. Parte 4: como publicar revisões sistemáticas. **Diagn Tratamento**, v.23, p.19-23, 2018.

POWRIE, W.; CENG, F.; BEAVEN, R. P. (1999). Hydraulic properties of household waste and implications for landfills. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering**, v.137, n. 4, p. 235–247, 1999.

RAMOS, M. G; ROSÁRIO-LIMA, V. M; AMARAL-ROSA, M. P. IRAMUTEQ Software and Discursive Textual Analysis: Interpretive Possibilities. In: **World Conference on Qualitative Research**. Springer, Cham. P. 58-72, 2018.

REDDY, K. R.; GANGATHULASI, J.; PARAKALLA, N. S.; HETTIARACHCHI, H.; BOGNER, J. E.; LAGIER, T. Compressibility and shear strength of municipal solid waste under short-term leachate recirculation operations. **Waste Management and Research**, v. 27, n. 6, p. 578–587, 2009.

REDDY, K. R.; HETTIARACHCHI, H.; GANGATHULASI, J.; BOGNER, J. E. Geotechnical properties of municipal solid waste at different phases of biodegradation. **Waste Management**, v. 31, n. 11, p. 2275–2286, 2011.

RAMY, A.; FLOODY, J.; RAGAB, M. M. F.; ARISHA, A. A scientometric analysis of Knowledge Management Research and Practice literature: 2003– 2015. **Knowledge Management Research & Practice**, v. 16, p. 66–77, 2018.

REMÉDIO, F. H. **Análise de estabilidade de taludes de aterro de resíduos sólidos urbanos utilizando parâmetros geotécnicos de propostas bibliográficas e correlações com o NSPT**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2014.

REZENDE, Jozrael Henriques et al. Composição gravimétrica e peso específico dos resíduos sólidos urbanos em Jaú (SP). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, p. 1-8, 2013.

ROCHA, G. N.; CARVALHO JÚNIOR, F. H.; JUCÁ, J. F. T. Estudo da estabilidade de célula para viabilizar aumento de vida útil em aterro sanitário. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 9., 2019, São Carlos. **Anais [...]**. São Carlos: IGS-Brasil/ABMS, 2019.

SCHULER, A. R. **Análise do comportamento de um aterro municipal de resíduos sólidos urbanos instrumentado**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010

SHARIATMADARI, N.; KARIMPOUR-FARD, M.; KERAMATI, M.; KOLARIJANI, H. J.; NAEBI, A. Fiber Content Impact on the Shear Strength of Msw Materials in Direct Shear Tests. **Proceedings Sardinia 2009, Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium, January**. 2011.

SHENG, Hui et al. Vertical Expansion Stability of an Existing Landfill: A Case Study of a Landfill in Xi'an, China. **Advances in Civil Engineering**, v. 2021, 2021.

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

SILVA, M. M. **Estudo geológico-geotécnico de uma encosta com problemas de instabilidade no município de Camaragibe – PE**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

STRAUSS, M. **Análise de estabilidade de talude do aterro sanitário da zona norte de Porto Alegre**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

STOLTZ, G.; TINET, A.-J.; STAUB, M. J.; OXARANGO, L.; GOURC, J.-P. Moisture Retention Properties of Municipal Solid Waste in Relation to Compression. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 138, n.4, p.535–543, 2012.

TORRENTE-VELÁSQUEZA, J.M.; CHIFARIC, R.; RIPAA, M.; GIAMPIETRO, M. Robust information for effective municipal solid waste policies: Identifying behaviour of waste generation across spatial levels of organization. **Waste Management**, v. 103, p. 208–217, 2020.

VAN GENUCHTEN, M. T. (1980). A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892-898.

VETTER-GINDELE, J.; BRAUN, A.; WARTH, G.; BUI, T.T.Q.; BACHOFER, F.; ELTROP, L. Assessment of Household Solid Waste Generation and Composition by Building Type in Da Nang, Vietnam. **Resources**, v. 8, n. 171, p. 1-22, 2019.

VILLALBAA, L.; DONALISIOA, R.S.; BASUALDO, N.E.C.; NORIEGA, R.B. Household solid waste characterization in Tandil (Argentina): Socioeconomic, institutional, temporal and cultural aspects influencing waste quantity and composition. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 152, 2020.

YAMAWAKI, Atsushi; DOI, Yoichi; OMINE, Kiyoshi. Slope stability and bearing capacity of landfills and simple on-site test methods. **Waste Management & Research**, v. 35, n. 7, p. 730- 738, 2017.

YE, Jian et al. Seepage model and spacing design of horizontal trench in landfills. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, p. 10, 2016.

XU, Q; TOLAYMAT, T; TOWNSEND, T. G. Impact of pressurized liquids addition on landfill slope stability. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.138, p. 472–480, 2012.

ZHANG, Z.; WANG, Y.; FANG, Y.; PAN, X.; ZHANG, J.; XU, H. Global study on slope instability modes based on 62 municipal solid waste landfills. **Waste Management and Research**, v.38, n.12, p. 1389–1404, 2020.