ESTABILIDADE DE TALUDES EM ATERRO SANITÁRIO SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE SATURAÇÃO

Cláudio Luis Araújo Neto[(1)]
Doutor em Engenharia Civil e Ambiental, mestre em Engenharia Civil e Ambiental, graduado em Engenharia Sanitária e Ambiental e licenciado em Ciências Agrárias. Professor do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária e do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal do Maranhão (UFMA).
Victor Emmanuel Avelino Gomes Bahia[(2)]
Doutorando em Engenharia Civil e Ambiental, mestre em Engenharia Civil e Ambiental e graduado em Engenharia Civil.
Dayana Darley Guedes Paz[(3)]
Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental, graduada em Engenharia Civil e Engenheira Projetista – ATECEL.
Daniel Epifânio Bezerra[(4)]
Doutorando em Engenharia Civil e Ambiental, mestre em Engenharia Civil e Ambiental e graduado em Engenharia Sanitária e Ambiental.
Veruschka Escariao Dessoles Monteiro[(5)]
Doutora em Engenharia Civil, mestre em Engenharia Civil e graduada em Engenharia Civil. Professora do Curso de Engenharia Civil e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Endereço[(1)]: MA-140, KM 04, Balsas – Maranhão, 65800-000 - Brasil - Tel: +55 83 98790-7200 e-mail: claudio.neto@ufma.br

RESUMO

A estabilidade de taludes em aterros sanitários é influenciada por vários fatores, dentre os quais destacam-se as características geotécnicas dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), a geometria do maciço e a presença de líquidos. Nesse contexto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a estabilidade dos taludes do Aterro Sanitário de Campina Grande-PB, considerando diferentes condições de saturação. Inicialmente, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, a partir da qual foi construído um banco de dados contendo parâmetros geotécnicos de RSU. Em seguida, aplicou-se estatística descritiva, visando à obtenção de valores representativos para utilização nas análises. As simulações de estabilidade foram realizadas no software GEO5, considerando dois cenários: ausência e presença de líquidos no interior do maciço. As análises contemplaram duas seções do aterro, incluindo todos os materiais constituintes. Os resultados indicaram que, na ausência de líquidos, os taludes apresentaram fatores de segurança superiores a 1,5, atendendo às recomendações das normas. Entretanto, com presença de líquidos, observou-se redução significativa desses fatores, com diminuições de até 58%, evidenciando a elevada influência do nível piezométrico na estabilidade do maciço sanitário. Dessa forma, conclui-se que o controle do nível de lixiviado e o monitoramento geotécnico contínuo são essenciais para garantir a estabilidade de aterros sanitários.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos sólidos urbanos, Lixiviado, Maciço sanitário.

INTRODUÇÃO

Os aterros sanitários são obras de engenharia utilizadas para a disposição ambientalmente adequada de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Devido a sua praticidade, baixo custo de implantação e operação quando comparada a outras tecnologias de tratamento de resíduos, essa técnica tem sido cada vez mais utilizada (Shkileva, 2021). A ausência de uma gestão e operação adequada desses empreendimentos pode ocasionar graves prejuízos às esferas social e ambiental, como a contaminação do solo e das águas subterrâneas, poluição atmosférica, impactos no ecossistema de modo abrangente e danos à saúde pública (Osra et al., 2021).

A ruptura de aterros sanitários tem sido um evento recorrente ao longo dos últimos anos, sendo destaque acidentes ocorridos no Brasil, na Índia, em Moçambique, no Sri Lanka, na Etiópia e China (Daciolo, 2020; Jucá et al., 2021). Esses incidentes são frequentemente associados a operações irregulares e má gestão dessas obras, manifestando-se,

por exemplo, através da obstrução dos sistemas de drenagem que pode resultar na elevação crítica dos níveis de lixiviado, um dos principais gatilhos para a ocorrência das rupturas. Sendo assim, é notável a importância dos aterros sanitários e a necessidade de estudos que garantam sua eficiência e segurança.

Por se tratar de um sistema geotécnico altamente complexo e heterogêneo, os aterros sanitários estão sujeitos à ocorrência simultânea de processos físicos, químicos e biológicos, associados principalmente à biodegradação dos resíduos, à geração e migração de gás e lixiviado e às variações das poropressões internas. Esses processos promovem modificações contínuas nas propriedades geotécnicas dos resíduos sólidos urbanos, afetando parâmetros como permeabilidade, tensões efetivas, resistência ao cisalhamento e compressibilidade do maciço, podendo comprometer a estabilidade dos taludes (Feng et al., 2021). Dessa forma, o alto potencial destrutivo e o comportamento variável dos aterros sanitários torna indispensável o monitoramento contínuo dessas obras, incluindo o acompanhamento das condições de estabilidade geotécnica, de modo a garantir a segurança ambiental e operacional desses empreendimentos.

OBJETIVO

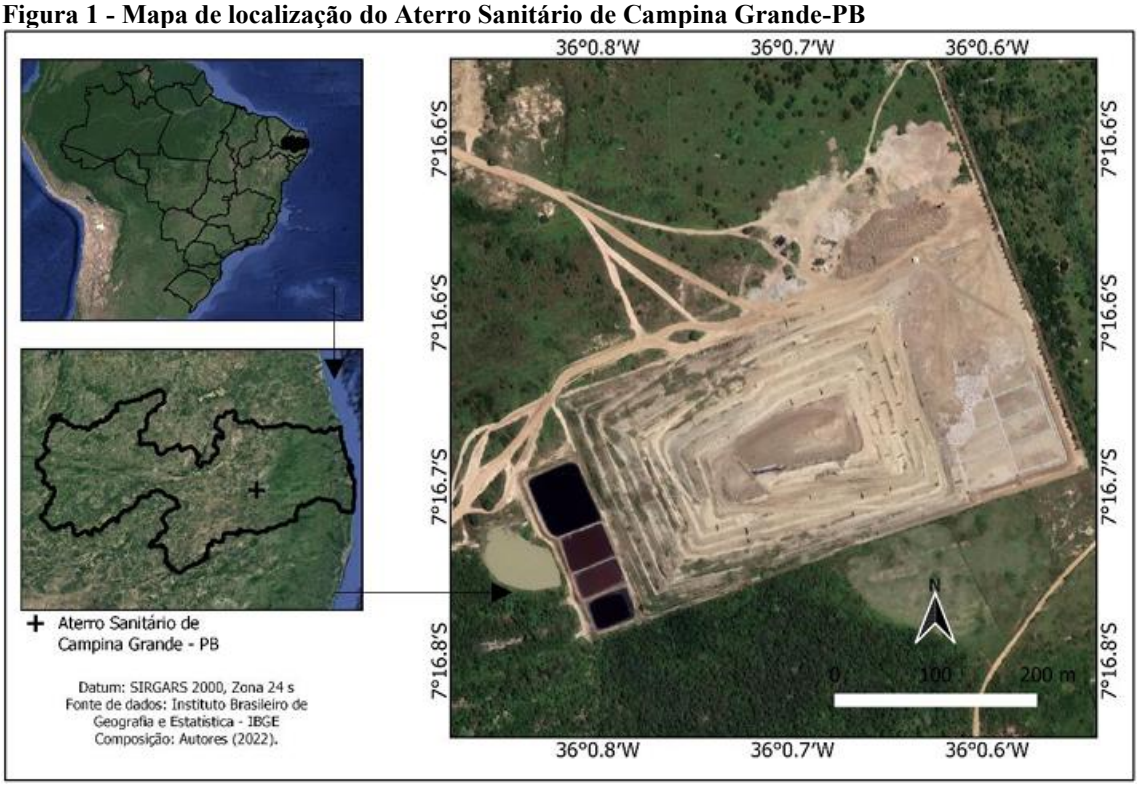
Realizar a análise de estabilidade de taludes do Aterro Sanitário situado no município de Campina Grande – PB, considerando duas seções distintas do maciço e situações com e sem a presença de lixiviado, permitindo a visualização do impacto desse parâmetro no fator de segurança.

MATERIAIS E MÉTODOS

Campo experimental

A pesquisa foi desenvolvida tendo como campo experimental o Aterro Sanitário de Campina Grande - PB (ASCG). O empreendimento está inserido no semiárido brasileiro, com temperatura do ar máxima anual de 28,6 ºC, mínima de 19,5 ºC e média de 22,7°C, evaporação anual de 1417,4 mm e pluviosidade média anual de 802,7 mm/ano. A Figura 1 exibe o ASCG.

Figura 1 - Mapa de localização do Aterro Sanitário de Campina Grande-PB



Fonte: Bezerra (2023).

Com a operação iniciada em 2015, o ASCG foi projetado para receber 350 tRSU/dia, resultando em uma vida útil de 25 anos, entretanto, durante o período da pesquisa, recebia em média, 1300 tRSU/dia, provenientes de mais de 115 municípios. Ademais, nesse período, o aterro estava operando apenas a Célula 3 e a sua geometria contemplava uma área de base de aproximadamente 400x200 metros e uma altura em torno de 45 metros (Figura 2), apresentando taludes com inclinação de 1:2 e bermas intermediárias com 6 m de largura.

Figura 2 – Imagem área do ASCG durante o período da pesquisa



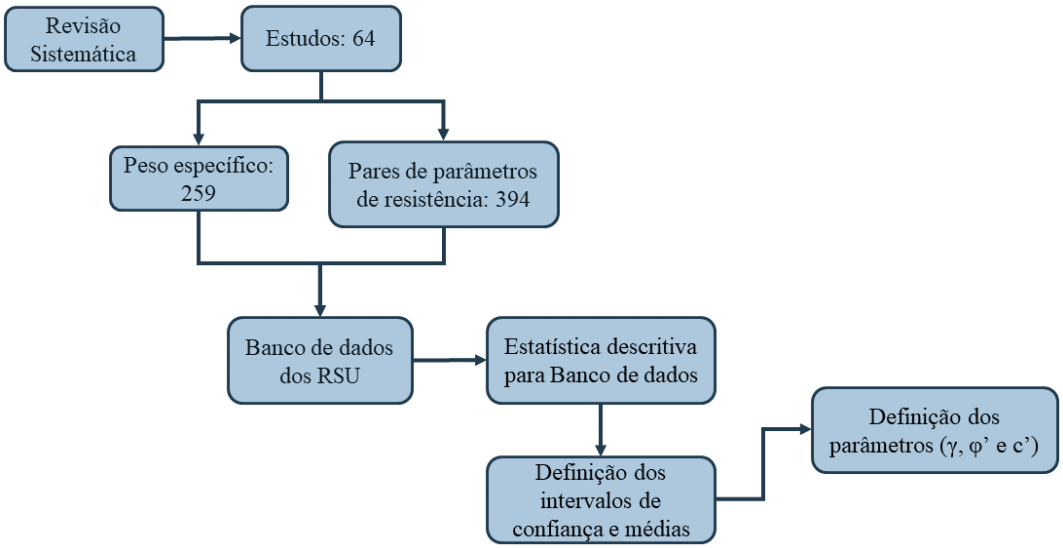
Fonte: Autoria própria (2024).

Parâmetros geotécnicos para os RSU

Para a obtenção do peso específico, ângulo de atrito e intercepto coesivo, parâmetros necessários para a realização das análises de estabilidade, foi feita uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL), cuja metodologia foi baseada em outros estudos que analisaram ou utilizaram a RSL, como Fernández-González *et al*. (2020) e Costa *et al*. (2022). A princípio, as palavras-chave relevantes foram definidas e as buscas iniciais por artigos para integrar o banco de dados foram conduzidas. As palavras-chave foram selecionadas com base nos dados que precisavam ser encontrados. Assim, foram definidos como palavras-chave: “resistência ao cisalhamento de RSU”, “tempo de aterramento de RSU”, “características dos RSU”, “resíduos sólidos urbanos”, “estabilidade de taludes de aterros sanitários”, “MSW shear strength”, “landfill slope stability” e “waste landfill age”.

Em razão da dificuldade de obtenção de estudos, foi necessária uma expansão do período de busca definido previamente, dessa maneira, passou a ser considerado a bibliografia dos últimos 30 anos. A busca foi conduzida nas bases de dados Web of Science, Scopus, Springer e Google Acadêmico. Ao fim desse levantamento, foram analisados os trabalhos encontrados em formato de artigos, dissertações, teses e capítulos de livros, para eliminar dados e informações duplicadas, totalizando 64 estudos com um número de 394 pares de parâmetros de resistência (ângulo de atrito efetivo, coesão efetiva) e 259 valores para o peso específico. A Figura 3 exibe um esquema de como foi realizado esse procedimento.

Figura 3 - Esquema do processamento dos dados



Fonte: Autoria própria (2026).

Estatística descritiva para os dados dos RSU

Ao final da revisão sistemática e com a criação do banco de dados para cada propriedade dos resíduos foi iniciada a análise desses dados. Através do uso do Microsoft Excel, com o auxílio da ferramenta "Análise de dados: Estatística descritiva" foi possível a definição dos principais parâmetros estatísticos para cada amostra. O objetivo da realização dessa análise foi a obtenção dos parâmetros de ângulo de atrito efetivo, coesão efetiva e peso específico que representassem, estatisticamente, os resíduos estudados. Assim, ao final dessa etapa de tratamento dos dados foram obtidos valores passíveis de serem utilizados nas análises de estabilidade de taludes, sendo eles as médias encontradas ao final da estatística descritiva. Além disso, a partir desse procedimento, foi possível obter e avaliar outros parâmetros estatísticos (Tabela 1) a respeito de cada propriedade, possibilitando uma compreensão mais abrangente e precisa das informações coletadas.

Tabela 1 - Parâmetros da estatística descritiva utilizados

Parâmetros estatísticos	
Média	Curtose
Erro Padrão	Assimetria
Mediana	Intervalo
Modo	Mínimo
Desvio Padrão	Máximo
Variância da Amostra	

Fonte: Autoria própria (2026).

Análise da estabilidade de taludes

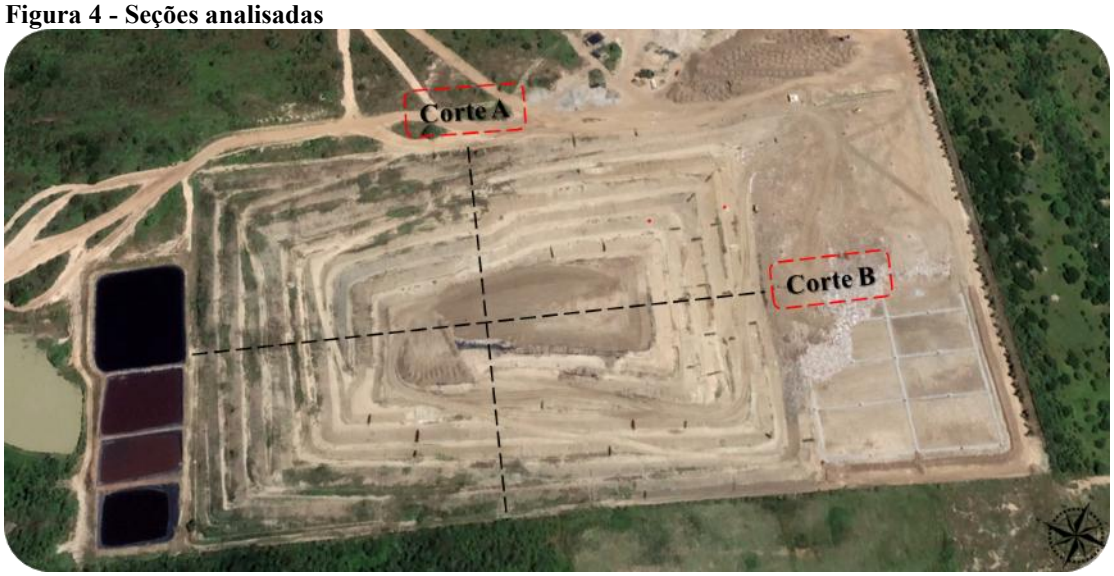
As simulações numéricas para análise da estabilidade dos taludes do ASCG foram realizadas no GEO5 que tem como finalidade resolver problemas geotécnicos, sendo utilizado nos estudos de Tosun (2018) e Rawat e Mohanty (2021), onde foram executadas análises de estabilidade de taludes de aterros de resíduos. O software apresenta uma função de otimização cujo intuito é buscar automaticamente a superfície crítica do talude por meio da variação do raio e centro do círculo que intercepta o maciço sanitário. Ele admite condições de heterogeneidade do maciço, anisotropia dos parâmetros de resistência, acréscimo de poropressão, águas superficiais e subterrâneas, sobrecargas, geossintéticos e eventos sísmicos.

O módulo do GEO5 que foi utilizado é denominado Estabilidade de Taludes, que por intermédio da teoria do equilíbrio limite e do Método de Morgenstern e Price (1965) determinou as superfícies críticas de ruptura e o fator de segurança, metodologia essa anteriormente utilizada nos estudos de Daciolo (2020) e Jucá *et al.* (2021). Os

parâmetros geotécnicos necessários para a análise de estabilidade dos taludes do ASCG, por meio do software, foram: intercepto coesivo efetivo, ângulo de atrito efetivo e peso específico dos resíduos.

Os cortes escolhidos (Figura 4) para as análises de estabilidade foram adotados em função da configuração geométrica que a Célula do aterro apresentou durante o período de levantamento de dados desse estudo, ocorrido entre 2023 e 2024. Os critérios para a escolha das seções foram as inspeções visuais realizadas no Aterro e as informações e dados de deslocamentos obtidos por meio dos levantamentos topográficos do monitoramento, permitindo, assim, a definição das regiões mais críticas. A geometria e os aspectos operacionais do ASCG são semelhantes a outros aterros sanitários localizados no Brasil.

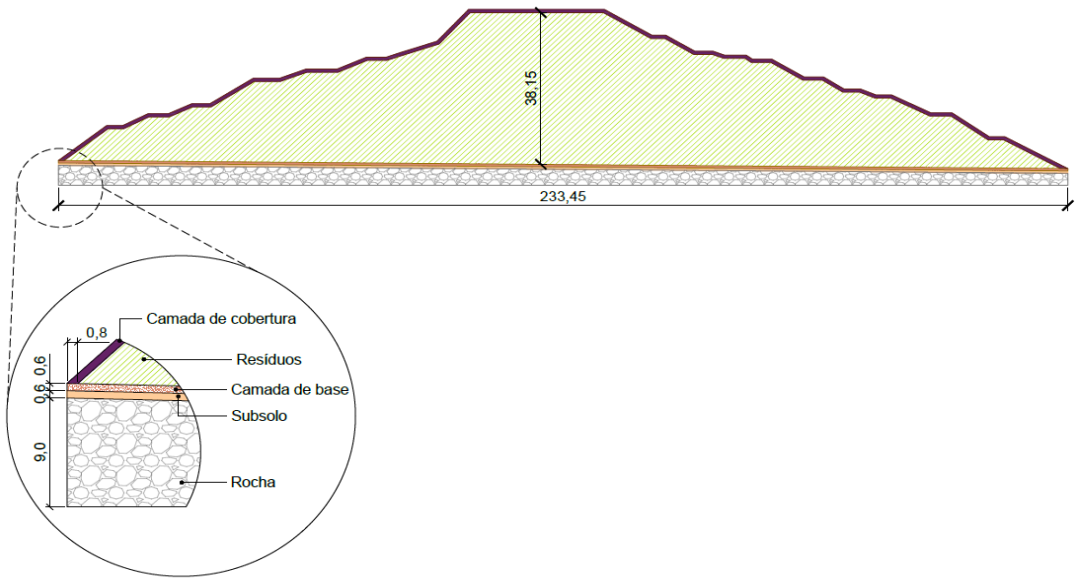
Figura 4 - Seções analisadas



Fonte: Autoria própria (2026).

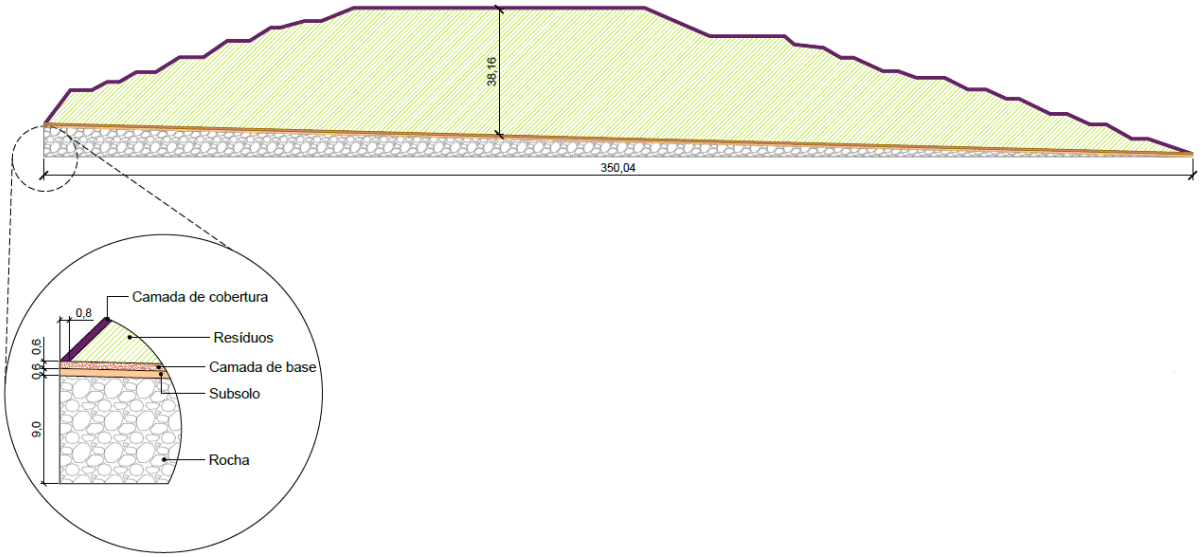
Apesar de alguns autores como Rocha *et al.* (2019) considerarem apenas os RSU como constituintes do maciço sanitário na análise de estabilidade dos taludes, outros elementos como a camada de cobertura, de base e subsolo podem desencadear a ruptura do talude (Araújo Neto, 2021). Por essa razão, nesse estudo foram incluídas nas análises a presença de todos esses elementos. As Figuras 5 e 6 exibem a geometria das seções transversal (Corte A) e longitudinal (Corte B), incluindo a distribuição das camadas.

Figura 5 - Corte A



Fonte: Autoria própria (2026).

Figura 6 - Corte B



Fonte: Autoria própria (2026).

Com o intuito de estimar o Fator de Segurança (FS) mínimo e a superfície de ruptura, foram estabelecidos dois cenários para a análise da estabilidade dos taludes do ASCG. O primeiro cenário considerou um sistema de drenagem perfeito, sem presença de líquidos no interior do maciço, enquanto o segundo contemplou o cenário mais crítico, com adoção do maior nível piezométrico monitorado no Aterro, que foi de 17m, conforme os trabalhos de Araújo Neto (2021) e Bahia *et al.* (2024a). Dessa forma, esse trabalho consistiu da avaliação quanto a estabilidade de 2 cortes, com cada corte sendo examinado em 2 cenários distintos (com e sem a presença de líquidos), onde para cada cenário foram encontradas 2 superfícies de ruptura (uma a esquerda do talude e outra a direita), totalizando 8 análises de estabilidade. Além disso, as características geotécnicas dos solos (subsolo e camada de base e cobertura) foram adotadas do trabalho de Araújo Neto (2021).

Como referência para as análises de estabilidade, foi considerado como talude estável, com nível de segurança elevado, aquele que apresentou um fator de segurança igual ou superior a 1,5, conforme as prescrições técnicas exibidas na NBR 11682 (ABNT, 2009).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Parâmetros geotécnicos para os RSU

A revisão sistemática de literatura realizada para essa pesquisa foi fundamentada em 64 estudos, resultando em 394 pares de parâmetros (ângulo de atrito efetivo e coesão efetiva) e 259 valores de peso específico. Parte do banco de dados construído está exibido na Tabela 2.

Tabela 2: Recorte do banco de dados geral para RSU

Ordem	*Estudo*	*Massa específica (g/cm³)*	*Idade*	*Φ' (º)*	*C' (kPa)*
1	Abreu e Vilar (2017)	0,91	25 anos	16	3
2		0,91		23	3
3		0,91		31	3
4		0,93	16 anos	19	0
5		0,93		26	0
6		0,93		34	1
7		0,87	11 anos	17	2
8		0,87		23	3
9		0,87		30	6

10		1,03	8 anos	17	1
224	Shariatmadari, Sadeghpour e Razaghian (2014)	0,59	5 anos	45,8	11,2
225		0,72	14 anos	34,1	12,2
226		65	21 anos	30,8	16,1
311	Zhan, Chen e Ling, (2008)	0,53	1,7	9,9	23,3
312		0,53	1,7	15	32
313		0,61	5	18	23
314		0,61	5	26	32
315		0,76	11	26	0

Fonte: Autoria própria (2025).

A partir desse banco de dados, foi realizada uma análise estatística, com nível de confiança de 95%, cujo resultado está apresentado na Tabela 3. Devido à limitada disponibilidade de informações consolidadas sobre as propriedades e o comportamento dos resíduos sólidos urbanos, a estatística descritiva é empregada como ferramenta para organizar, sintetizar e interpretar os dados disponíveis, permitindo avaliar tendências, dispersão e variabilidade dos dados geotécnicos. Dessa forma, torna-se possível contribuir para o aprimoramento da base de conhecimento acerca desses materiais.

Tabela 3: Estatística descritiva do banco de dados para RSU

Parâmetros	Ângulo de atrito efetivo	Coesão efetiva	Peso específico (kN/m³)
Média	26,78	16,91	8,88
Erro padrão	0,48	0,73	0,02
Mediana	26,6	13,7	9,2
Modo	29	0	10,5
Desvio padrão	9,49	13,68	2,85
Variância da amostra	89,98	187,24	8,14
Curtose	-0,11	-0,1	-0,65
Assimetria	0,12	0,81	0,04
Intervalo	53,1	54,9	13,2
Mínimo	0	0	3,4
Máximo	53,1	54,9	16,6

Fonte: Autoria própria (2026).

A estatística descritiva é uma ferramenta de análise, de grande relevância para discussão da qualidade de dados. Nesse sentindo, Paiva (2009), afirma que quando o coeficiente de variação for maior que 30%, a dispersão é considerada alta, entretanto, valores entre 15 e 30% são considerados de média dispersão e abaixo de 15% a dispersão é considerada baixa. De acordo com a Tabela 3, os coeficientes de variação para o ângulo de atrito efetivo e coesão efetiva são, respectivamente 35,4% e 81%, ambos enquadrando-se na faixa correspondente a alta dispersão. Esse resultado é esperado tendo em vista que esse banco de dados é constituído por estudos com distintas metodologias, resíduos de diferentes idades, composições, origens, entre outras variáveis. Esse comportamento evidencia a variabilidade que os RSU apresentam, ressaltando a importância de uma caracterização fiel as particularidades desse material.

De acordo com Boscov (2008) e Ramaiah, Ramana e Datta (2017), o peso especifico mais comum para RSU é de 10 kN/m³. Por essa razão, considerando que a média encontrada foi de 8,88 kN/m³, esta pesquisa utiliza um valor inferior ao normalmente encontrado na literatura. Isso se deve ao intuito de realizar as análises de estabilidade a favor da segurança, uma vez que ao empregar um peso específico menor do que o provável real, a análise é efetuada em uma situação mais crítica, onde um dos principais fatores que contribuem para a integridade dos taludes está sendo intencionalmente subdimensionado.

Parâmetros geotécnicos dos solos

Nesta pesquisa foram consideradas as características dos materiais constituintes das demais camadas do aterro sanitário, como cobertura e base, além do subsolo. A consideração dessas camadas nas análises de estabilidade dos taludes é divergente ao visto nos estudos de Corrêa (2020) e Xu *et al*. (2021), contudo, é fundamental considerar todos os materiais que compõem o maciço sanitário, uma vez que o subsolo (depósito natural), a camada de base e cobertura também podem ocasionar a ruptura da obra. A Tabela 4 apresenta os valores utilizados nas análises de estabilidade.

Tabela 4: Dados das análises de estabilidade

Material	Saturação	Coesão efetiva (kPa)	Ângulo de atrito efetivo (º)	Peso específico (kN/m³)
Camada de base e cobertura	-	1,7	26	18,8
Subsolo	-	7,8	31	14,5
Rocha	-	-	-	26

Fonte: Adaptado de Araújo Neto (2021).

Conforme demonstrado por Araújo Neto (2021), observa-se que as camadas de solo estão de acordo com os requisitos técnicos estabelecidos pela NBR 13896 (ABNT, 1997), tendo em vista que os valores de permeabilidade do solo são inferiores a 10^{-7} e 10^{-8} m/s, para o subsolo e camada de base, respectivamente. Já em relação a compactação, conforme Araújo (2017), o ASCG possui grau de compactação superior a 95%, atendendo os padrões sugeridos por Kabir e Taha (2004). É importante frisar que não existe regulamentação nacional ou internacional que especifique a execução da camada de base e cobertura de aterros sanitários usando os parâmetros de compactação até o momento.

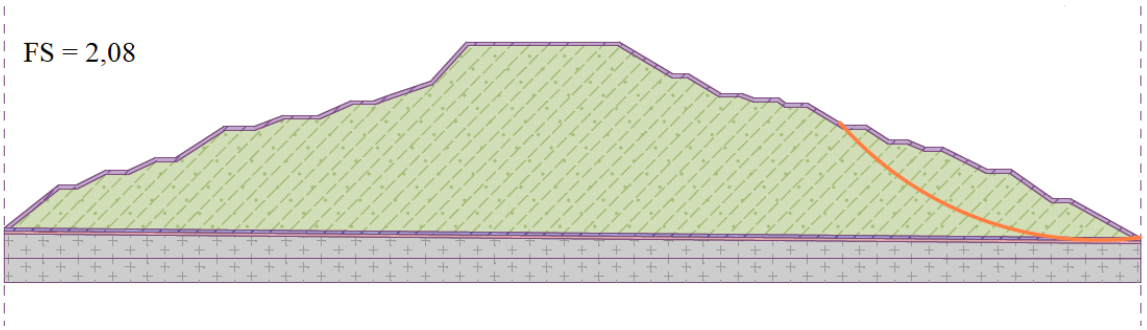
Por sua vez, a camada de cobertura, apesar de não atender as recomendações feitas pela CETESB (1993) quanto a classificação do solo que deve ser empregado, nas condições de compactação descritas a camada atende à permeabilidade exigida, principal critério verificado na avaliação de desempenho. Portanto, de um modo geral, o solo utilizado nas camadas de cobertura, base e subsolo, nas condições de execução, apresenta um desempenho adequado (Araújo Neto, 2021).

Análises de estabilidade

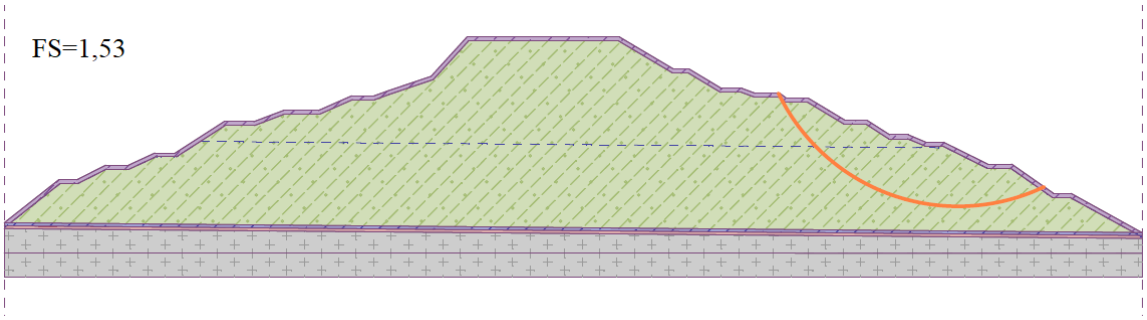
Nesta seção, são apresentadas as análises de estabilidade considerando a configuração geométrica do ASCG no período de desenvolvimento da pesquisa, incluindo as camadas de cobertura, de base, subsolo e rocha. Para a realização das análises foram usados os valores médios das propriedades (peso específico, ângulo de atrito efetivo e intercepto coesivo efetivo) obtidos através da estatística descritiva. Os resultados numéricos e gráficos estão expostos na Tabela 5, onde está exibido o resumo dos Fatores de Segurança, e nas Figuras 7 e 8.

Figura 7 - Análise de estabilidade Corte A: a) Superfície de ruptura a direita, sem presença de líquidos; b) Superfície de ruptura a direita, com a presença de líquidos; c) Superfície de ruptura a esquerda, sem presença de líquidos; d) Superfície de ruptura a esquerda, com presença de líquidos

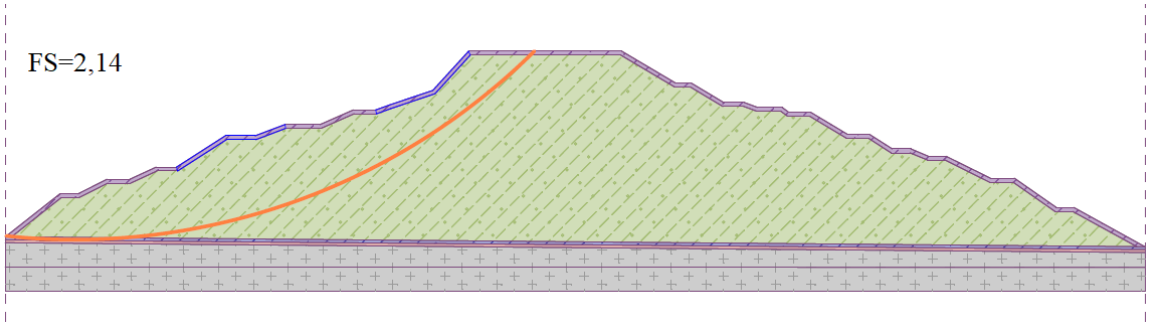
a)



b)



c)



d)

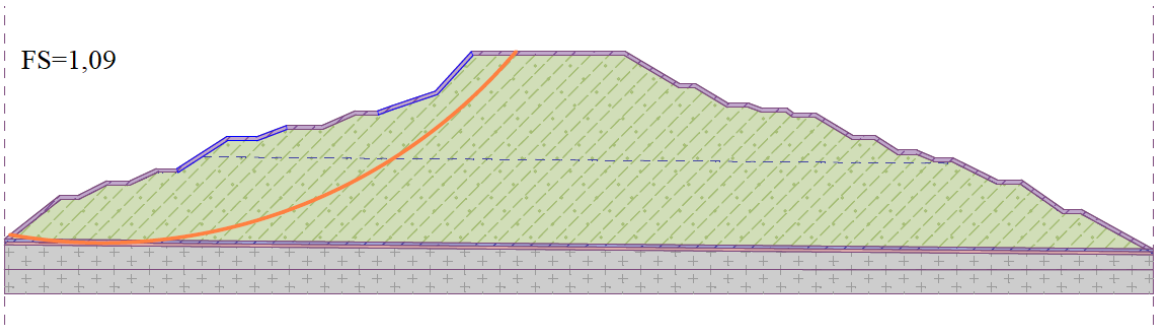
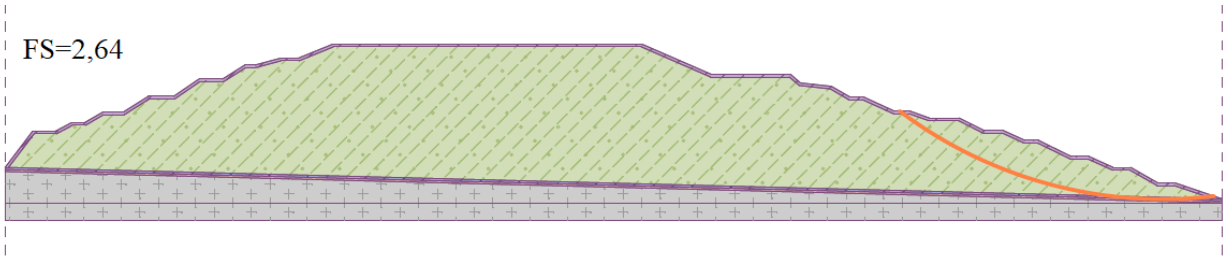
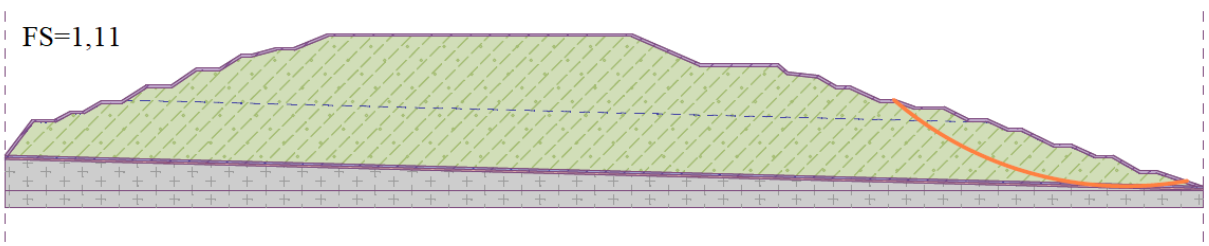


Figura 8 - Análise de estabilidade Corte B: a) Superfície de ruptura a direita, sem presença de líquidos; b) Superfície de ruptura a direita, com a presença de líquidos; c) Superfície de ruptura a esquerda, sem presença de líquidos; d) Superfície de ruptura a esquerda, com presença de líquidos

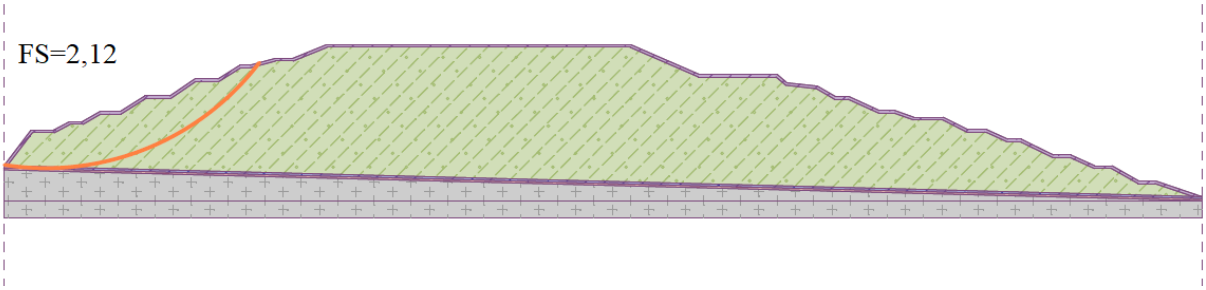
a)



b)



c)



d)

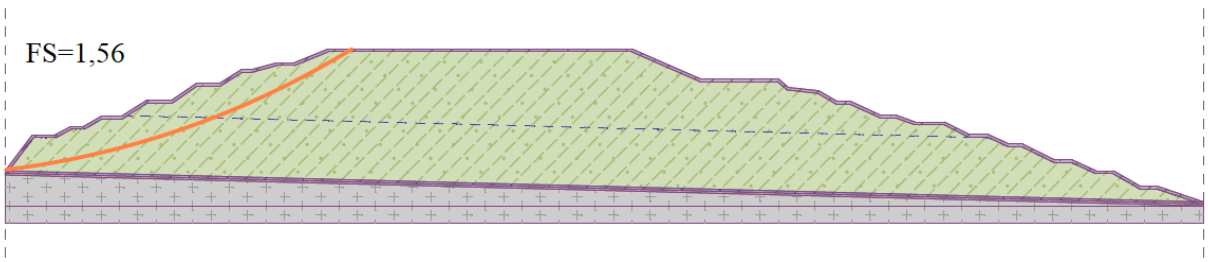


Tabela 5 - Resumo dos Fatores de Segurança

Cenário	Superfície de ruptura	Corte A	Corte B
(1) Sem presença de líquidos	Ruptura à direita	2,08	2,64
	Ruptura à esquerda	2,14	2,12
(2) Com presença de líquidos	Ruptura à direita	1,53	1,11
	Ruptura à esquerda	1,09	1,56

Fonte: Autoria própria (2026).

A partir das análises feitas, pode-se inferir que para as situações em que não há a presença de líquidos o aterro permanece estável em ambas as seções consideradas, apresentando um Fator de Segurança acima de 1,50, conforme o definido pela NBR 11682 (ABNT, 2009). No entanto, para os cenários em que foi considerado um nível piezométrico de líquidos de 17m, conforme dados do monitoramento realizado previamente, nota-se uma redução significativa do fator de segurança. É importante frisar que essa medição crítica do nível de líquidos foi obtida em apenas um piezômetro do ASCG e, portanto, não refletiu a condição de todo o aterro no momento em que o dado foi coletado. Dessa forma, esse nível piezométrico não representa a situação real do aterro naquele instante, mas sim o pior cenário possível.

No caso do corte A, observou-se uma redução de 26,44% e 49,00%, para as superfícies do lado direito e esquerdo, respectivamente. Por sua vez, no caso do corte B, houve um decréscimo de 58,00%, correspondente a superfície do lado direito e 26,41%, referente a superfície do lado esquerdo. Dessa forma, é evidente que o nível de lixiviado exerce grande influência na estabilidade do aterro. De um modo geral, esses resultados são condizentes com estudos encontrados na literatura, como dos autores Rocha *et al.* (2019) e Norafidi *et al.* (2024), que obtiveram respostas semelhantes, com reduções consideráveis do fator de segurança em função da elevação do nível piezométrico de líquidos e/ou teor de umidade do material.

As reduções mais acentuadas de 49,00% (corte A, lado esquerdo) e 58,00% (corte B, lado direito) podem ser explicadas pelas diferenças de geometria, quando comparadas ao lado que sofreu menos influência do nível piezométrico (corte A, lado direito e corte B, lado esquerdo). Em relação a seção A, o lado esquerdo apresentou um declive mais intenso, com uma menor distância horizontal utilizada para a distribuição das bermas, resultando em inclinações mais fortes quando comparado ao lado direito. Na seção B, por sua vez, o FS crítico pode estar relacionado a região do lado direito predominantemente saturada, condição propiciada pelo elevado nível piezométrico e pela configuração geométrica do local.

Outro fator que pode ter contribuído para a diminuição expressiva do FS é a utilização de parâmetros geotécnicos com valores abaixo dos reais para os RSU do ASCG, como pode ser visto nos trabalhos de Bezerra *et al.* (2025), Bahia *et al.* (2024b) e Araújo Neto (2021), principalmente no que diz respeito ao peso específico dos resíduos, cuja média se mostrou abaixo dos valores recomendados por outros autores e é uma propriedade que exerce grande influência na resistência dos materiais. Portanto, as situações em que os fatores de segurança estão abaixo de 1,50, representam situações incomuns ao ASCG, sendo elas únicas e extremamente críticas.

Por essa razão, levando em consideração o histórico de monitoramento contínuo do ASCG que pode ser observado nas pesquisas de Bahia *et al.* (2024a) e Bezerra *et al.* (2025), o ASCG pode ser considerado como estável, desde que as condições empregadas para a realização dessas análises não se tornem uma realidade constante.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nas análises de estabilidade realizadas para o Aterro Sanitário de Campina Grande-PB, conclui-se que a estabilidade dos taludes está diretamente condicionada às características geométricas do maciço, às propriedades geotécnicas dos resíduos sólidos urbanos e à presença de líquidos no interior do aterro.

A revisão sistemática da literatura, associada à aplicação de estatística descritiva, mostrou-se uma estratégia eficiente para a obtenção de parâmetros representativos de resistência e peso específico dos RSU, contribuindo para a consolidação de uma base de dados geotécnicos aplicáveis às análises de estabilidade de aterros sanitários. Os elevados coeficientes de variação observados evidenciaram a elevada heterogeneidade e variabilidade inerentes aos resíduos sólidos urbanos, reforçando a necessidade de caracterizações específicas para cada empreendimento.

As análises numéricas realizadas pelo Método de Morgenstern-Price demonstraram que, em condições sem presença de líquidos, os taludes analisados apresentaram fatores de segurança superiores ao valor mínimo recomendado pelas normas, caracterizando condições adequadas de estabilidade. Contudo, a consideração do nível piezométrico de 17 m promoveu reduções expressivas nos fatores de segurança, atingindo decréscimos de até 58%, o que evidencia a significativa influência das poropressões associadas ao lixiviado sobre o comportamento mecânico do maciço sanitário. Além disso, verificou-se ainda que diferentes geometrias de taludes influenciaram diretamente os mecanismos de ruptura e os valores de fator de segurança obtidos, especialmente em regiões com maiores inclinações.

De modo geral, os resultados obtidos indicam que o ASCG apresenta condições satisfatórias de estabilidade, entretanto, cenários associados à elevação excessiva do nível de líquidos podem comprometer significativamente a segurança do maciço, ressaltando a importância da eficiência dos sistemas de drenagem, do monitoramento geotécnico contínuo e do controle operacional do aterro sanitário.

Por fim, destaca-se que a utilização de modelos geotécnicos específicos para resíduos sólidos urbanos pode contribuir para análises mais representativas do comportamento dos aterros sanitários, possibilitando maior precisão na avaliação da estabilidade e no entendimento dos mecanismos de ruptura associados a esses materiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682**: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

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

3. 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.

4. ARAUJO 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) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.

5. ARAUJO, P. S. **Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário**. 2017. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

6. BAHIA, V. E. A. G. *et al*. Comparação entre sistemas de drenagem de lixiviado de Aterro Sanitário. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 9, p. e8047, 19 set. 2024a.

7. BAHIA, V. E. A. G. *et al*. *Influence of municipal solid waste composition on the shear strength of a landfill cell*. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 21, p. 1-15, 2024b. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13762-024-06191-6.

8. BEZERRA, Ana Leticia Ramos *et al*. Avaliação da estabilidade de taludes de aterro sanitário: uma análise bidimensional e de sensibilidade do fator de segurança. **Revista de Geociências do Nordeste (REGNE)**, v. 11, n. 1, 2025. DOI: 10.21680/2447-3359.2025v11n1ID38202.

9. BEZERRA, Daniel Epifânio *et al*. Evolução do comportamento dos resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário sob aspectos mecânicos. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

10. BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 248 p.

11. CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Resíduos sólidos industriais**. 2. ed. São Paulo: CETESB, 1993. 233 p.

12. CORRÊA, C. L. **Estudo das propriedades mecânicas dos resíduos sólidos urbanos**. 2020. 231 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

13. COSTA, A. M. *et al*. Social evaluation of municipal solid waste management systems from a life cycle perspective: a systematic literature review. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 27, n. 5, p. 719–739, 29 abr. 2022.

14. DACIOLO, L. V. P. **Parâmetros de resistência de RSU**: abordagem probabilística para análises de estabilidade de taludes de aterros de resíduos. 2020. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

15. FENG, S.-J.; LU, S.-F.; ZHENG, Q.-T.; BAI, Z.-B. A multi-phase, multi-component model for coupled processes in anaerobic landfills: theory, implementation and validation. **Géotechnique**, v. 71, n. 9, p. 826-842, 2021.

16. FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, J. M. *et al*. Recycling Organic Fraction of Municipal Solid Waste: Systematic Literature Review and Bibliometric Analysis of Research Trends. **Sustainability**, v. 12, n. 11, 4798, p. 1-22, 11 jun. 2020.

17. JUCÁ, J. F. T.; NORBERTO, A. S.; SANTOS JÚNIOR, J. I. dos; MARINHO, F. A. Brasília municipal solid waste landfill: a case study on flow and slope stability. **Soils and Rocks**, v. 44, n. 4, p. 1-13, 2021.

18. KABIR, M. H.; TAHA, M. R. Assessment of physical properties of a granite residual soil as an isolation barrier. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 9, Bund. D, p. 1-11, 2004.

19. NORAFIDI, N. N. *et al*. Influence of Rainfall Infiltration on Landfill Slope Stability. **Journal of Hunan University Natural Sciences**, v. 51, n. 12, p. 15-24, 2024.

20. OSRA, F. A. *et al*. Municipal Solid Waste Characterization and Landfill Gas Generation in Kakia Landfill, Makkah. **Sustainability**, v. 13, n. 3, 1462, p. 1-13, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su13031462.

21. PAIVA, W. **Aplicação da estatística para descrever o comportamento de um solo expansivo**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

22. RAMAIAH, B. J.; RAMANA, G. V.; DATTA, M. Mechanical characterization of municipal solid waste from two waste dumps at Delhi, India. **Waste Management**, v. 68, p. 275-291, 2017.

23. RAWAT, P.; MOHANTY, S. Experimental investigation on MSW fine mixed with fibers: fiber reinforced waste. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v. 25, n. 3, 04021009, 2021.

24. 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. p. 1-8.

25. TOSUN, Y. I. Stabilization of Slope with Use of Coal Boiler Bottom Ash, Fly Ash and Geosynthethics for Bottom Seal Layer for Municipal Waste Landfill. *In*: ISRM INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN ROCK MECHANICS (TUNIROCK), 1., 2018, Tunes. **Proceedings...** Richardson: OnePetro, 2018. p. 191-198.

26. XU, A. *et al*. Applying artificial neural networks (ANNs) to solve solid waste-related issues: A critical review. **Waste Management**, v. 124, p. 385-402, 2021.

27. SHARIATMADARI, N.; SADEGHPOUR, A. H.; RAZAGHIAN, F. Effects of aging on shear strength behavior of municipal solid waste. **Int J Civ Eng**, v. 12, n. 3, p. 226-237, 2014.

28. SHKILEVA, A. Implementation of a degassing system at the MSW landfill. *Civil Engineering Journal*, **v. 7**, **n. 6**, p. 1008–1014, 2021. DOI: 10.28991/cej-2021-03091706.

29. MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. **The analysis of the stability of general slip surfaces. Géotechnique**, [s. l.], v. 15, n. 1, p.79-93, mar. 1965.

30. ZHAN, T. L. T.; CHEN, Y. M.; LING, W. A. Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China. **Engineering Geology**, [s. l.], p. 97–111, 2008.