XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/117

Revisão da literatura sobre o uso de modelagem computacional na análise de estabilidade de aterros sanitários

Karolyne dos Santos Balbino Cordeiro
Discente, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, karolyne.santos@estudante.ufjf.br

Igor Gordiano Fernandes Heleno
Discente, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil,
igorgordiano.fernandes@estudante.ufjf.br

Jonathan do Amaral Braz
Discente do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, jonathan.amaral@estudante.ufjf.br

Cátia de Paula Martins
Docente do Departamento de Transportes e Geotecnia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, catia.martins@ufjf.br

Júlia Righi de Almeida
Docente do Departamento de Transportes e Geotecnia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, julia.righi@ufjf.br

RESUMO: Os aterros sanitários constituem estruturas relativamente recentes em comparação às obras geotécnicas convencionais e passaram a ocupar papel central na gestão de resíduos após a promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), que os define como forma ambientalmente adequada de disposição final. Diferentemente de barragens e fundações, apresentam comportamento dinâmico e evolutivo, sofrendo transformações contínuas desde a operação até o pós-encerramento, com alterações nas propriedades físicas e químicas decorrentes da biodegradação, recalques e variações de umidade e poropressão. A infiltração hídrica favorece a geração de lixiviado, modifica as pressões neutras e influencia diretamente a resistência e o estado de tensões do maciço, evidenciando a importância da análise integrada entre fluxo e estabilidade. Nesse contexto, como etapa metodológica para fundamentar os resultados e a discussão deste artigo, realizou-se uma revisão de artigos publicados entre 2020 e 2025 no Portal de Periódicos da CAPES, com foco no uso de modelagem computacional em estudos relacionados à estabilidade de aterros sanitários. A análise evidenciou três linhas predominantes: modelagens exclusivamente hidráulicas, análises acopladas fluxo–estabilidade e abordagens essencialmente mecânicas. Do total examinado, dois estudos dedicaram-se apenas à modelagem hidráulica, quatro adotaram estratégias acopladas e dois priorizaram avaliações mecânicas. Apesar da recorrência de abordagens acopladas, observa-se a necessidade de maior integração entre ferramentas como SEEP/W e SLOPE/W, a fim de proporcionar análises mais robustas e representativas do comportamento hidro-mecânico dessas estruturas.

PALAVRAS-CHAVE: Aterros sanitários, Estabilidade de taludes, Fator de segurança, Modelagem computacional.

ABSTRACT: Sanitary landfills are relatively recent structures when compared to conventional geotechnical works and have assumed a central role in waste management following the enactment of the Política Nacional de Resíduos Sólidos (Law No. 12,305/2010), which defines them as an environmentally appropriate method for final disposal. Unlike dams and foundations, landfills exhibit a dynamic and evolving behavior, undergoing continuous transformations from operation through post-closure, with changes in physical and chemical properties resulting from biodegradation processes, settlements, and variations in moisture content and pore pressure. Water infiltration promotes leachate generation, alters pore-water pressures, and directly affects shear strength and the stress state of the waste mass, thereby highlighting the importance of integrated analyses that

couple flow and stability. Within this context, as a methodological step to support the results and discussion presented in this paper, a review of articles published between 2020 and 2025 was conducted using the CAPES Periodicals Portal, focusing on the application of computational modeling in studies addressing landfill stability. The analysis identified three predominant approaches: exclusively hydraulic modeling, coupled flow–stability analyses, and primarily mechanical assessments. Of the studies reviewed, two were devoted solely to hydraulic modeling, four adopted coupled strategies, and two emphasized mechanical evaluations. Despite the recurrent use of coupled approaches, there remains a need for greater integration between tools such as SEEP/W and SLOPE/W in order to provide more robust and representative analyses of the hydro-mechanical behavior of these structures.

KEYWORDS: Sanitary landfills, Slope stability, Factor of safety, Computational modeling.

1 INTRODUÇÃO

O avanço da urbanização aliado ao crescimento demográfico tem resultado em um aumento expressivo na geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), configurando-se como um dos principais entraves ao saneamento ambiental no Brasil (Santos, 2008). Esse cenário está diretamente relacionado não apenas à expansão populacional, mas também à intensificação do consumo, ao aumento do poder aquisitivo e à incorporação constante de novas tecnologias ao cotidiano da sociedade (Silva *et al*., 2020).

Conforme a Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública (2011), no contexto nacional, a ocupação urbana muitas vezes ocorre de forma acelerada e sem o acompanhamento proporcional de sistemas estruturados e eficientes de coleta, tratamento e destinação final de resíduos. Como reflexo dessa dinâmica, a gestão tende a concentrar esforços predominantemente na etapa de disposição final, ampliando a demanda por soluções tecnicamente adequadas (ABLP, 2011).

Em resposta a esse cenário, a promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), por meio da Lei Federal nº 12.305/2010, configurou um importante avanço no âmbito regulatório ao estabelecer o aterro sanitário como a modalidade ambientalmente adequada para a disposição final de rejeitos, devendo ser executado de forma a não gerar riscos à saúde pública nem causar danos ao meio ambiente. A referida legislação também definiu princípios, diretrizes e metas voltadas à eliminação progressiva dos lixões e aterros controlados. Posteriormente, o novo marco legal do saneamento, instituído pela Lei nº 14.026/2020, atualizou os prazos para o encerramento dessas estruturas irregulares. A partir dessas diretrizes normativas, observou-se a ampliação da implantação de aterros sanitários no país, ao mesmo tempo em que se tornou evidente a necessidade de constante aperfeiçoamento técnico dessas estruturas, visando assegurar maior eficiência operacional, segurança ambiental e conformidade com os requisitos normativos.

De acordo com Norberto *et al*. (2020), os aterros sanitários configuram-se como obras geotécnicas de elevada complexidade e com particularidades que as diferenciam das estruturas convencionais. Os maciços de resíduos apresentam elevada heterogeneidade e comportamento mecânico não linear, sofrendo modificações progressivas desde a fase inicial de disposição até o período pós-encerramento. Ao longo desse processo, ocorrem alterações substanciais nas propriedades físicas, químicas e mecânicas do material, decorrentes da biodegradação, dos recalques diferenciais e das variações de umidade e poropressões internas. Essas transformações influenciam diretamente o comportamento resistente do maciço, podendo comprometer as condições de estabilidade dos taludes e a segurança global da estrutura.

Diante dessa problemática, o uso de ferramentas de modelagem numérica e computacional, como os softwares SEEP/W e SLOPE/W, torna-se essencial para a análise dos fenômenos de fluxo e estabilidade. Este estudo tem como objetivo realizar uma revisão da literatura sobre a aplicação combinada dessas aplicações, destacando os avanços, limitações e oportunidades na área da geotecnia ambiental.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Heterogeneidades dos resíduos sólidos urbanos

Os aterros sanitários constituem sistemas formados pela deposição sucessiva de resíduos com distintas origens, granulometrias, composições e estágios de degradação, o que lhes confere elevada heterogeneidade e

significativa variabilidade espacial das propriedades físicas e mecânicas (Norberto *et al*., 2020). A estratificação resultante da disposição em camadas sucessivas gera contrastes locais de densidade, teor de umidade e grau de decomposição, condicionando um comportamento mecânico intrinsecamente não uniforme do maciço. Ademais, a presença de fração orgânica acentua o caráter evolutivo do sistema, pois os processos de biodegradação promovem recalques diferenciais, geração de lixiviado e biogás e alterações graduais nas propriedades geotécnicas ao longo do tempo (Zhan *et al*., 2017)

As estruturas de aterros sanitários apresentam elevada complexidade devido à interação simultânea entre as fases sólida, líquida e gasosa dos resíduos. Além disso, envolvem a atuação conjunta dos solos de cobertura, camadas drenantes, sistemas de impermeabilização e dispositivos de contenção. Essa interação integrada influencia diretamente os parâmetros de resistência ao cisalhamento, as condições de drenagem interna e os processos de geração e dissipação de poropressões (Benvenuto; Cipriano, 2010). Dessa forma, a estabilidade global do aterro não está condicionada exclusivamente à sua configuração geométrica, mas também às condições hidráulicas vigentes e às práticas operacionais adotadas ao longo de sua vida útil.

2.2 Influência da água na estabilidade dos aterros

A água exerce papel determinante na estabilidade de aterros sanitários, atuando tanto por meio da infiltração pluvial quanto pela própria geração interna de lixiviados decorrente da degradação dos resíduos orgânicos. A elevação do teor de umidade no interior do maciço tende a aumentar as poropressões e reduzir as tensões efetivas, impactando diretamente a resistência ao cisalhamento dos resíduos (Yang; Xu; Chai, 2020).

A interação entre água, resíduos e sistemas de drenagem demanda avaliação integrada e contínua, uma vez que a eficiência da coleta de lixiviados e do controle das águas superficiais está diretamente associada à manutenção da estabilidade global. Situações de drenagem deficiente, obstruções ou eventos climáticos intensos podem induzir estados críticos, alterando significativamente os fatores de segurança (Yang; Xu; Chai, 2020).

Yang, Xu e Chai (2020) destacam ainda que a representação adequada das condições de infiltração e das propriedades hidráulicas do maciço é determinante para a correta simulação do comportamento do lixiviado. Sob a perspectiva da modelagem computacional, a correta representação da influência da água é elemento central nas análises numéricas de estabilidade. A definição de condições de contorno hidráulicas, níveis de lixiviado e coeficientes de permeabilidade condicionam diretamente os resultados obtidos em termos de tensões efetivas e fatores de segurança. Dessa forma, a inserção criteriosa de dados hidrológicos e operacionais nos modelos computacionais contribui para a redução de incertezas, favorece representações mais próximas da realidade e possibilita avaliações mais confiáveis ao longo das diferentes etapas de operação e pós-encerramento dos aterros sanitários.

2.3 Modelagem numérica do fluxo e da estabilidade

De acordo com o estudo de Meye *et al.* (2022), a modelagem numérica do fluxo e da estabilidade em aterros sanitários está inserida em um cenário de alta complexidade, marcado pela heterogeneidade dos resíduos, pela variabilidade espacial e temporal das propriedades e pela influência constante de fatores ambientais. Ainda segundo o autor, a natureza evolutiva do maciço, decorrente da degradação de matéria orgânica, da geração de lixiviados e dos alteamentos sucessivos, impõe desafios adicionais à representação computacional.

No que se refere à análises de estabilidade, é pontuado no trabalho de Gomes (2019) que métodos de equilíbrio limite continuam amplamente empregados na prática geotécnica, permitindo estimar o fator de segurança a partir da relação entre esforços resistentes e solicitantes ao longo de superfícies potenciais de ruptura. A resistência ao cisalhamento é usualmente representada por critérios como o de Mohr-Coulomb, com parâmetros obtidos a partir de ensaios ou valores médios equivalentes, considerando a dificuldade de caracterização detalhada dos resíduos. Embora tais métodos não reproduzam explicitamente o campo de deformações, constituem ferramentas objetivas e consolidadas para verificação da segurança de taludes e seções críticas do aterro.

Por outro lado, abordagens baseadas no Método dos Elementos Finitos permitem uma análise mais abrangente, ao resolver de forma acoplada as equações de fluxo e de equilíbrio mecânico. Essa técnica possibilita acompanhar a redistribuição de tensões, a evolução das poropressões e a concentração de deformações ao longo do tempo, além de incorporar a heterogeneidade espacial do maciço. Ademais, favorece a realização de análises paramétricas e de sensibilidade, particularmente relevantes diante das incertezas associadas às propriedades dos resíduos (Meye *et al*., 2022).

Por fim, diferentes ferramentas computacionais podem ser citadas como exemplos de aplicação nas análises hidráulicas e de estabilidade em estudos geotécnicos. Programas baseados no Método dos Elementos Finitos, como o SEEP/W e o ABAQUS, são utilizados para simulações de fluxo em meios porosos, permitindo análises em regime permanente e transiente, tanto em condições saturadas quanto não saturadas. Para análises de estabilidade de taludes, utilizam-se softwares fundamentados no Método do Equilíbrio Limite, como o SLOPE/W, que possibilita a determinação do Fator de Segurança a partir da geometria, das pressões neutras e dos parâmetros de resistência do material. Além disso, modelos hidrológicos como o HELP podem ser empregados para estimar o balanço hídrico e a geração de percolado em aterros sanitários. Dessa forma, diferentes ferramentas computacionais podem ser citadas como exemplos de aplicação nas análises hidráulicas e de estabilidade em estudos geotécnicos (Baldodano-Goulding; Poveda-Montoya, 2024; Park; Kim; Kang, 2021; Wang, 2021; Yang; Xu; Chai, 2020).

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada baseou-se em uma revisão da literatura, envolvendo etapas de busca, seleção, leitura crítica e organização dos artigos científicos conforme critérios de relevância temática, atualidade e aderência ao objetivo do estudo. As pesquisas foram realizadas no Portal de Periódicos da CAPES, contemplando publicações no período de 2020 a 2025, recorte temporal definido com o propósito de reunir estudos recentes que evidenciam avanços na modelagem numérica aplicada a aterros sanitários. Destaca-se que foram considerados artigos publicados nos idiomas português e inglês, visando ampliar o escopo da revisão e contemplar tanto a produção científica nacional quanto internacional.

A estratégia de busca utilizou combinações booleanas de palavras-chave em inglês, estruturadas da seguinte forma: ("landfill" OR "solid waste" OR "MSW") AND ("seepage" OR "rainfall" OR "infiltration") AND ("stability analysis" OR "slope stability"). Foram excluídos estudos com acesso restrito e aqueles que não abordavam aterros sanitários ou estruturas análogas como objeto de investigação.

4 RESULTADOS

Os estudos foram organizados conforme o tipo de abordagem analítica, considerando o nível de integração entre os fenômenos hidráulicos e mecânicos nas modelagens numéricas (Tabela 1). Assim, foram classificados em três grupos: (i) modelagens hidráulicas isoladas, voltadas exclusivamente à simulação de escoamento e infiltração, sem cálculo do fator de segurança; (ii) análises acopladas fluxo–estabilidade, nas quais as poropressões obtidas na modelagem hidráulica são incorporadas à análise geotécnica; e (iii) avaliações predominantemente mecânicas, centradas na estabilidade ou no desempenho estrutural, com consideração simplificada do regime de fluxo ou inexistente.

Tabela 1. Classificação dos estudos segundo a abordagem de modelagem numérica e os softwares empregados (Autores, 2026).

Grupos	Artigos Pesquisados	Software
Modelagens hidráulicas isoladas	Yang, Xu e Chai (2020)	ABAQUS 6.14
	Baltodano-Goulding e Poveda-Montoya (2024)	HELP v4.0
Análises acopladas fluxo–estabilidade	Meye et al. (2022)	Não especificado
	Park, Kim e Kang (2021)	SEEP/W + SLOPE/W
	Gao, Zhu e Zhang (2022)	Não especificado
	Zhang et al. (2025)	Não especificado

Grupos	Artigos Pesquisados	Software
Avaliações predominantemente mecânicas	Budihardjo et al. (2021) Wang (2021)	Não especificado SLOPE/W

4.1 Modelagens hidráulicas isoladas

O estudo desenvolvido por Yang, Xu e Chai (2020) analisou, por meio de modelagem tridimensional, o escoamento de lixiviado em um aterro sanitário real localizado em Xi'an, empregando o software ABAQUS 6.14 com sub-rotinas definidas pelo usuário para representar a heterogeneidade hidráulica do maciço. A simulação foi conduzida com enfoque transiente da infiltração sob diferentes cenários de precipitação intensa. Consideraram-se variações de condutividade hidráulica e densidade ao longo da profundidade, possibilitando avaliar a formação de níveis suspensos de lixiviado e a evolução das poropressões.

Baltodano-Goulding e Poveda-Montoya (2024) realizaram uma análise de balanço hídrico aplicada ao Aterro Miramar, na Costa Rica, utilizando o software HELP v4.0 (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance). A metodologia consistiu na simulação dos principais componentes do ciclo hidrológico como precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial e infiltração, com a finalidade de estimar a geração de lixiviado ao longo do tempo. Foram empregados dados climáticos locais, características geométricas do aterro, condições de drenagem e propriedades hidráulicas dos materiais determinadas por ensaios laboratoriais, incluindo a curva característica solo–água para representação do comportamento não saturado. As estimativas obtidas por diferentes metodologias foram comparadas com dados de campo, sendo o modelo HELP V 4.0 o que apresentou melhor concordância com as medições observadas.

4.2 Análises acopladas fluxo–estabilidade

O estudo de Meye *et al.* (2022) envolveu modelagem numérica integrada do campo de percolação e da estabilidade de taludes, considerando explicitamente a heterogeneidade dos resíduos. A análise foi realizada por elementos finitos em duas e três dimensões, com implementação de sub-rotinas para representar variações espaciais de permeabilidade, peso específico e resistência ao cisalhamento. O regime hidráulico saturado e não saturado foi modelado de forma transiente, incluindo cenários de colmatação do sistema de drenagem. A estabilidade foi avaliada pelo método de redução de resistência, permitindo a obtenção direta do fator de segurança no próprio modelo numérico.

A análise de Park, Kim e Kang (2021) foi conduzida com utilização sequencial dos módulos SEEP/W e SLOPE/W. Inicialmente, o SEEP/W foi empregado para simular o fluxo não saturado sob eventos de precipitação intensa, considerando a curva característica solo–água (SWCC) e condições transientes; posteriormente, as poropressões obtidas foram transferidas ao SLOPE/W para cálculo do fator de segurança pelo método de Bishop. O diferencial do trabalho consiste na incorporação experimental do reforço radicular à coesão do solo de cobertura, integrando ensaios laboratoriais à modelagem numérica.

Ademais, o estudo de Gao, Zhu e Zhang (2022) propõe um método analítico para avaliar a estabilidade de coberturas com barreira capilar inclinadas sob infiltração de chuva. A abordagem combina o modelo de infiltração de Green–Ampt com o método de equilíbrio limite de Janbu, considerando a evolução da frente de umedecimento, a redistribuição lateral da água e a atuação das forças de percolação na camada de solo fino. O fator de segurança é obtido por procedimento iterativo, assumindo a frente de umedecimento como superfície potencial de ruptura. Os resultados indicam que a saturação progressiva da camada superior reduz significativamente a estabilidade.

Por fim, o estudo de Zhang *et al.* (2025) analisou o comportamento mecânico de compósitos solo–raiz aplicados à estabilização de taludes constituídos por resíduos de construção e demolição, combinando investigação experimental e modelagem numérica por elementos finitos. Inicialmente, foram realizados ensaios de tração em raízes de azevém e ensaios de cisalhamento direto em compósitos solo–raiz sob diferentes teores de umidade e proporções de reforço radicular, permitindo a quantificação dos parâmetros de resistência e a avaliação do incremento de coesão promovido pelas raízes. Na etapa numérica, foi implementada uma análise bidimensional de infiltração transiente baseada na equação de Richards para meios não saturados, com incorporação da curva característica solo–água pelo modelo de Van Genuchten. A estabilidade foi avaliada no próprio modelo em elementos finitos, com determinação do fator de segurança, análise de plastificação e

monitoramento dos deslocamentos e da evolução da saturação. Os resultados evidenciaram que o reforço radicular reduz deslocamentos, limita a progressão de zonas plásticas e eleva o fator de segurança mesmo sob chuva prolongada.

4.3 Avaliações predominantemente mecânicas

O estudo de Budihardjo *et al.* (2021) investigou o desempenho hidráulico e mecânico de misturas de cinza volante e bentonita (FAB) aplicadas como material de revestimento (liner) em sistemas de contenção de aterros sanitários. Foram realizados ensaios laboratoriais, incluindo cisalhamento direto, permeabilidade e determinação de propriedades físicas, com diferentes teores de bentonita, a fim de avaliar a influência da composição na resistência ao cisalhamento e na estabilidade do material. Os resultados indicaram que o aumento do teor de bentonita promove acréscimo da coesão e da resistência ao cisalhamento, ainda que a exposição a soluções salinas possa reduzir parcialmente esse ganho. A análise numérica foi conduzida no SLOPE/W para estimativa do fator de segurança, evidenciando desempenho satisfatório para determinadas proporções da mistura. O fluxo não foi modelado de forma transiente ou acoplada, concentrando-se o estudo na melhoria das propriedades mecânicas e na viabilidade do material como alternativa de baixo custo para liners.

De forma semelhante, Wang (2021) realizou a análise de estabilidade de uma barragem de contenção de resíduos sólidos, componente integrante de um aterro sanitário, que apresentava indícios de recalque excessivo e risco potencial de instabilidade. Após investigação de campo e execução de ensaios geotécnicos, os parâmetros obtidos subsidiaram simulações numéricas no software SLOPE/W, com determinação do fator de segurança da estrutura. Os resultados indicaram que a condição existente não atendia plenamente aos critérios normativos, justificando a proposição de medidas corretivas, como reforço estrutural e intervenções para mitigação de danos por percolação e fissuração.

5 DISCUSSÕES

A análise sistemática dos estudos selecionados evidenciou aspectos metodológicos relevantes, com implicações diretas para a robustez, a reprodutibilidade e o avanço das investigações em geotecnia ambiental. Inicialmente, destaca-se a ausência de especificação dos softwares empregados em metade dos trabalhos analisados (4 de 8 artigos), o que configura uma limitação significativa sob a perspectiva científica. A não explicitação das ferramentas computacionais utilizadas compromete a transparência metodológica, dificulta a replicabilidade dos modelos numéricos e restringe a possibilidade de comparação crítica entre diferentes abordagens, considerando que distintos programas podem adotar formulações constitutivas, esquemas de discretização e algoritmos de solução específicos.

Outro resultado relevante refere-se à expectativa de predominância da integração sequencial entre modelagem hidráulica e análise de estabilidade, particularmente por meio da combinação SEEP/W e SLOPE/W. Tal associação é amplamente reconhecida na literatura técnica por possibilitar a incorporação consistente das poropressões obtidas na simulação de fluxo à determinação do fator de segurança. Entretanto, verificou-se que apenas 1 dos 8 estudos analisados adotaram explicitamente essa estratégia integrada, evidenciando que, apesar de sua reconhecida fundamentação teórica e aplicabilidade prática, essa abordagem ainda não se consolidou como prática dominante no conjunto amostral considerado.

No que se refere à distribuição metodológica, observou-se que 2 estudos se concentraram exclusivamente em modelagens hidráulicas, 4 adotaram análises acopladas fluxo–estabilidade e 2 privilegiaram avaliações predominantemente mecânicas. A maior incidência de análises acopladas reforça o reconhecimento da natureza intrinsecamente hidromecânica dos problemas geotécnicos, sobretudo em contextos envolvendo infiltração, variações de poropressão e possíveis reduções da resistência ao cisalhamento. Ainda assim, a presença significativa de abordagens isoladas indica que simplificações persistem, seja pela dissociação entre fluxo e estabilidade, seja pela consideração simplificada do regime hidráulico.

Entre os avanços observados, destaca-se a adoção de modelagens tridimensionais por elementos finitos com representação da heterogeneidade hidráulica e da variabilidade espacial dos parâmetros, bem como o uso sistemático de curvas característica solo–água (SWCC) e de modelos constitutivos, como o de Van Genuchten,

para descrever o comportamento não saturado com maior rigor. Também se verifica a incorporação experimental do reforço radicular em modelos numéricos e a determinação do fator de segurança diretamente no domínio computacional,por meio de técnicas como a redução progressiva dos parâmetros de resistência ao cisalhamento no método dos elementos finitos, reduzindo a dependência exclusiva de procedimentos simplificados baseados no equilíbrio limite. Esses avanços elevam a fidelidade física das simulações e permitem analisar, com maior consistência, fenômenos como a formação de níveis suspensos de lixiviado, a evolução de zonas plásticas e a influência de eventos pluviométricos extremos na estabilidade do maciço, consolidando uma tendência de maior integração hidromecânica nas análises.

6 CONCLUSÃO

A presente revisão evidenciou que a modelagem numérica aplicada à análise de estabilidade de aterros sanitários tem avançado de forma significativa nos últimos anos, especialmente no que se refere à incorporação de abordagens hidromecânicas mais integradas e ao uso de técnicas baseadas no Método dos Elementos Finitos. Entretanto, os resultados também revelam limitações metodológicas importantes, destacando-se a ausência de especificação dos softwares utilizados em parte expressiva dos estudos, fator que compromete a reprodutibilidade científica e dificulta a consolidação comparativa do conhecimento produzido. Observou-se que, embora as análises acopladas fluxo–estabilidade representem o grupo mais frequente entre os trabalhos examinados, a utilização explícita e sequencial dos módulos SEEP/W e SLOPE/W ainda é restrita.

Os avanços identificados como a modelagem tridimensional, o uso de curvas característica solo–água, a incorporação de modelos constitutivos mais representativos e a determinação direta do fator de segurança em campo numérico apontam para uma tendência de maior fidelidade física das simulações. Tais progressos ampliam a capacidade preditiva das análises, permitindo investigar cenários críticos associados a eventos pluviométricos extremos, falhas de drenagem e evolução de poropressões ao longo da vida útil do aterro.

Por fim, ressalta-se que o recorte temporal e a limitação a uma única base de dados indicam a necessidade de ampliação futura da revisão, incluindo períodos mais extensos e outras bases indexadoras, a fim de consolidar um panorama mais abrangente das tendências contemporâneas. Nesse contexto, reforça-se o potencial do uso integrado de SEEP/W e SLOPE/W como alternativa promissora para análises mais consistentes, contribuindo para o aprimoramento técnico da geotecnia ambiental e para a segurança operacional dos aterros sanitários.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFJF pela concessão da bolsa de iniciação científica BIC/UFJF, vinculada ao projeto de pesquisa intitulado “Estudo da influência de eventos climáticos extremos na estabilidade de aterros sanitários”, coordenado pela autora Júlia Righi de Almeida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública – ABLP (2011). *Revista Limpeza Pública*. São Paulo, n. 77, 2º trimestre de 2011. ISSN 1806-0390.

Baldodano-Goulding, R.; Poveda-Montoya, A. (2024) *Water balance estimation for an ordinary solid waste sanitary landfill in Costa Rica. Waste Management*, v. 34, n. 10, p. 1828–1838. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.05.008.

Benvenuto, C.; Cipriano, M. A. (2010) Modelo reológico de comportamento de resíduos e aterros sanitários, segundo critérios de projeto e operação atuais no Brasil. *Revista Limpeza Pública*, São Paulo, n. 74, p. 42–47, 2010.

Brasil (2010). Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos [...]. Brasília.

Brasil (2020). Lei no 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento [...]. Brasília.

Budihardjo, M. A.; Syafrudin, S. ; Priyambada, I. B.; Ramadan, B. S. (2021) . *Hydraulic stability of fly ash-bentonite mixtures in landfill containment system*. E3S Web of Conferences, v. 148, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202014801003.

Gao, C.; Zhu, Y.; Zhang, Y. (2022) *Stability analysis of the inclined capillary barrier covers under rainfall condition*. Buildings, Basel, v. 12, n. 3, 2022. DOI: 10.3390/buildings12030347.

GOMES, T. B. S (2019) *Modelagem e caracterização geotécnica do solo da barragem do Assentamento Olivencia localizada no município de Quixadá/CE*. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Campus Russas, Russas, 89p.

Meye, S. M.; Li, G.; Shen, Z.; Gan, L.; Xu, L. (2022) *Research on seepage field and slope stability considering heterogeneous characteristics of waste piles: a less costly way to reduce high leachate levels and avoid accidents.* Sustainability, v. 14.

Norberto, A. S.; Corrêa, C. L.; Mariano, M. O. H.; Jucá, J. F. T. (2020) Análise estatística da variabilidade de parâmetros de resistência ao cisalhamento de aterros sanitários. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 5, n. 1, p. 108–116.

Park, J.; Kim, I.; Kang, J. K. (2021) *Root reinforcement effect on cover slopes of solid waste landfill in soil bioengineering*. Sustainability, v. 13, n. 3. DOI: 10.3390/su13031101.

Santos, T. F. L. (2008) *Estudo experimental da camada de cobertura do aterro Morro do Céu, Niterói – RJ*. Dissertação de Mestrado em Saneamento Ambiental: controle da poluição urbana e industrial), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Silva, C. S. S.; Boll, N.; Zanin, G. B.; Peretti, G.; Souza, D. S. (2020) Análise histórica da geração, coleta e destinação dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. *Revista Tecnologia e Sociedade*, v. 16, n. 41, p. 125–138, ed. Especial.

Wang, X. (2021) *Stability analysis and repair of a garbage dam*. Natural Hazards, v. 45, n. 3, p. 375–385. DOI: 10.1007/s11069-007-9175-3.

Yang, R.; Xu, Z.; Chai, J. (2020) Numerical analysis of three-dimensional infiltration in a municipal solid waste landfill under rainfall. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 29, n. 2, p. 1953–1963. DOI: 10.15244/pjoes/110044.

Zhan, L. T.; Xu, H.; Chen, Y.; Lü, F.; Lan, J.; Shao, L.; Lin, W. (2017) *Biochemical, hydrological and mechanical behaviors of high food waste content MSW landfill: Liquid-gas interactions observed from a large-scale experiment*. Waste Management, v. 63, p. 27–40.

Zhang, Z.; Tian, A.; Zhou, Y.; Ding, C.; Tang, Q. (2025) Ryegrass root-soil composites mechanical properties and its slope stability: experimental study and numerical analysis. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 75, n. 2, p. 164–179. DOI: 10.1080/10962247.2024.2436531.