

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MODELOS DE PREVISÃO DE RECALQUES EM ATERROS SANITÁRIOS: REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA E ANÁLISE CRÍTICA DAS ABORDAGENS, PARÂMETROS E
DESEMPENHO

JEAN CLÁUDIO DE ANDRADE MASINI

JUIZ DE FORA

2026

MODELOS DE PREVISÃO DE RECALQUES EM ATERROS SANITÁRIOS: REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA E ANÁLISE CRÍTICA DAS ABORDAGENS, PARÂMETROS E
DESEMPENHO

JEAN CLÁUDIO DE ANDRADE MASINI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Juiz de Fora, como
requisito parcial à obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Civil.

Área de Conhecimento: Geotecnia

Orientadora: Júlia Righi de Almeida

Juiz de Fora

Faculdade de Engenharia da UFJF

2026

MODELOS DE PREVISÃO DE RECALQUES EM ATERROS SANITÁRIOS: REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA E ANÁLISE CRÍTICA DAS ABORDAGENS, PARÂMETROS E
DESEMPENHO

JEAN CLÁUDIO DE ANDRADE MASINI

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora constituída de acordo com a Resolução Nº 01/2018 do Colegiado do Curso de Engenharia Civil, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em:

Por:

Profa. D.Sc. Júlia Righi de Almeida (Orientadora)
Universidade Federal de Juiz de Fora

Profa. D.Sc. Tatiana Tavares Rodriguez (Examinadora 01)
Universidade Federal de Juiz de Fora

Profa. D.Sc. Catia de Paula Martins (Examinadora 02)
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dedico este trabalho à minha querida mãe. Desde o meu primeiro dia de vida, ela foi o maior exemplo de amor, carinho e fé. Em sua memória, tornarei todos os nossos sonhos realidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me sustentado até aqui.

Agradeço à minha família e aos meus amigos, que tanto me apoiaram ao longo desta trajetória, comemorando cada etapa e me incentivando diante de cada desafio. Sem vocês, nada disso seria possível.

Agradeço ao PET Civil UFJF, grupo que considero um verdadeiro divisor de águas em minha graduação. Foram três anos de participação que contribuíram de forma imensurável para a minha formação. Nesse período, pude compreender melhor a importância da Engenharia Civil, a responsabilidade que transcende os aspectos técnicos da profissão e, também, encontrar o caminho que desejo seguir.

Por meio do PET Civil, tive a honra de conhecer Júlia Righi, minha grande referência na Geotecnia e orientadora deste trabalho. Não tenho dúvidas de que nossos encontros e conversas ampliaram minha visão, despertaram novos interesses e me motivaram a seguir buscando conhecimento e desenvolvimento.

Também por meio do PET Civil, conheci grandes amigos que tornaram meus dias mais leves e divertidos, compartilharam comigo diferentes etapas da graduação, entre dificuldades e momentos felizes.

Agradeço também à Pimenta de Ávila e seus incríveis profissionais, por proporcionar um ambiente estimulante, desafiador e acolhedor, no qual pude vivenciar, de diferentes formas, a atuação profissional. Essas experiências me motivam a buscar continuamente o meu desenvolvimento, com o objetivo de contribuir cada vez mais para os projetos, para os resultados e para a sociedade.

Finalmente, agradeço à Universidade Federal de Juiz de Fora pelo ensino público, inclusivo e de qualidade. Agradeço também a todos os docentes, técnicos e profissionais da Faculdade de Engenharia, espaço que, por muito tempo, foi como uma segunda casa para mim.

RESUMO

A previsão de recalques em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos constitui um desafio relevante para a engenharia geotécnica, devido à elevada heterogeneidade dos resíduos e à interação entre processos mecânicos, hidráulicos, biológicos, térmicos e gasosos ao longo do tempo. Esses recalques podem comprometer a estabilidade do maciço, a integridade dos sistemas de drenagem, a funcionalidade da cobertura final e a vida útil dos aterros, tornando necessária a compreensão crítica dos modelos utilizados para sua estimativa. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo consolidar uma análise crítica dos modelos de previsão de recalques em aterros sanitários reportados na literatura. A pesquisa foi desenvolvida a partir de buscas na base Scopus, com seleção, triagem, leitura integral e sistematização dos estudos relacionados ao tema. Ao final do processo, foram analisados 51 artigos, organizados conforme a abordagem predominante dos modelos, incluindo formulações empíricas, constitutivas, numéricas e acopladas. Os resultados evidenciaram uma evolução progressiva das metodologias, desde modelos simplificados baseados em ajustes de dados de campo até abordagens capazes de representar de forma integrada processos mecânicos, hidráulicos, biodegradativos e térmicos. Observou-se que a acurácia das previsões depende fortemente da calibração com dados locais, da qualidade dos parâmetros de entrada, da disponibilidade de monitoramentos de longo prazo e da representação adequada da biodegradação, da umidade, da geração de gás e da temperatura. Verificou-se ainda que a elevada variabilidade espacial e temporal dos resíduos sólidos urbanos, a escassez de dados experimentais representativos e a dificuldade de generalização dos modelos permanecem como limitações importantes. Concluiu-se que a escolha do modelo deve considerar a finalidade da análise, a disponibilidade de dados, o nível de complexidade requerido e as condições específicas do aterro, sendo recomendada a ampliação de programas de monitoramento e de procedimentos padronizados para obtenção de parâmetros.

Palavras-chave: modelos de previsão de recalques; aterros sanitários; resíduos sólidos urbanos.

ABSTRACT

Settlement prediction in municipal solid waste landfills represents a significant challenge for geotechnical engineering due to the high heterogeneity of the waste and the interaction among mechanical, hydraulic, biological, thermal, and gas-related processes over time. These settlements may compromise the stability of the waste mass, the integrity of drainage systems, the performance of the final cover, and the service life of landfills, making a critical understanding of the models used for their estimation essential. In this context, this study aimed to consolidate a critical overview of the settlement prediction models for landfills reported in the literature. The research was conducted based on searches in the Scopus database, followed by the selection, screening, full-text reading, and systematization of studies related to the subject. At the end of the process, 51 articles were analyzed and organized according to the predominant modeling approach, including empirical, constitutive, numerical, and coupled formulations. The results revealed a progressive evolution of the methodologies, ranging from simplified models based on the fitting of field data to approaches capable of integrating mechanical, hydraulic, biodegradation, and thermal processes. Prediction accuracy was found to depend strongly on calibration using local data, the quality of input parameters, the availability of long-term monitoring data, and the adequate representation of biodegradation, moisture, gas generation, and temperature. It was also found that the high spatial and temporal variability of municipal solid waste, the scarcity of representative experimental data, and the difficulty of generalizing the models remain important limitations. It is concluded that model selection should consider the purpose of the analysis, data availability, the required level of complexity, and the specific conditions of the landfill. Therefore, the expansion of monitoring programs and the adoption of standardized procedures for parameter determination are recommended.

Keywords: settlement prediction models; landfills; municipal solid waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma da Metodologia Adotada no Presente Estudo	19
Figura 2 – Ilustração dos Tipos de Modelos de Previsão de Recalques	27
Figura 3 – Distribuição temporal dos estudos avaliados	54
Figura 4 – País de realização dos estudos analisados	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Strings e filtros aplicados à etapa de busca de artigos	14
Quadro 2 – Informações sobre os estudos com abordagem numérica	35
Quadro 3 – Informações sobre os estudos com abordagem empírica	43
Quadro 4 – Informações sobre os estudos com abordagem constitutiva	48
Quadro 5 – Informações sobre os estudos com abordagem de modelos acoplados	52
Quadro 6 – Relação de tipos de modelo por ano de publicação	55
Quadro 7 – Principais mecanismos considerados pelos modelos de previsão de recalques avaliados	60
Quadro 8 – Principais grupos de parâmetros utilizados	62
Quadro 9 – Requisitos de aplicação e nível de complexidade das diferentes abordagens de modelagem para previsão de recalques em aterros sanitários	64
Quadro 10 – Resumo de desempenho dos diferentes modelos avaliados	68
Quadro 11 – Principais fatores que influenciam a acurácia das previsões	69
Quadro 12 – Síntese das principais lacunas, desafios e perspectivas futuras identificadas na literatura sobre modelos de previsão de recalques em aterros sanitários	72

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAR	Reatores anaeróbios consolidantes
CTHBM	<i>Coupled Thermo-Hydro-Bio-Mechanical</i> (modelo termo-hidro-bio-mecânico acoplado)
ELIA	Células experimentais de grande escala
FLAC	<i>Fast Lagrangian Analysis of Continua</i>
GML	<i>Gimpo Metropolitan Landfill</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
HHO-GRNN	<i>Harris Hawks Optimizer–Generalized Regression Neural Network</i>
ID	Identificação do artigo
LGCIE	Células biorreatoras experimentais de 1,2 m ³
MAE	<i>Mean Absolute Error</i> (erro absoluto médio)
MAPE	<i>Mean Absolute Percentage Error</i> (erro percentual absoluto médio)
MBT	<i>Mechanically Biologically Treated</i>
MSW	<i>Municipal Solid Waste</i>
NBR	Norma Brasileira
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i> (raiz do erro quadrático médio)
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SBAS-InSAR	<i>Small Baseline Subset–Interferometric Synthetic Aperture Radar</i>
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TDBI	<i>Temperature-Dependent Biodegradation-Induced</i> (recalque induzido pela biodegradação dependente da temperatura)
TMB	<i>Thermo-Mechanical-Biological</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	11
1.2 OBJETIVOS	13
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2 METODOLOGIA	14
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)	20
3.2 COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DOS RESÍDUOS	21
3.3 ATERROS SANITÁRIOS	23
3.4 ATERROS SANITÁRIOS BIORREACTORES	24
3.5 MODELOS DE PREVISÃO DE RECALQUES	25
4 MODELOS DE PREVISÃO DE RECALQUES APLICADOS EM ATERROS SANITÁRIOS	28
4.1 MODELOS NUMÉRICOS	28
4.2 MODELOS EMPÍRICOS	36
4.3 MODELOS CONSTITUTIVOS	44
4.4 MODELOS ACOPLADOS	49
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
5.1 PANORAMA GERAL E EVOLUÇÃO TEMPORAL DA LITERATURA ANALISADA	54
5.2 CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS E PARÂMETROS UTILIZADOS	57
5.2.1 MECANISMOS CONSIDERADOS PELOS MODELOS	57
5.2.2 PRINCIPAIS PARÂMETROS EMPREGADOS	60
5.2.3 DADOS NECESSÁRIOS E COMPLEXIDADE DAS ABORDAGENS	62
5.3 DESEMPENHO DAS DIFERENTES ABORDAGENS DE MODELAGEM	64
5.4 LACUNAS, DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS	69
6 CONCLUSÕES	74
REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305/2010, estabelece diretrizes para a gestão e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos, reconhecendo a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos como uma das etapas essenciais desse processo (Brasil, 2010). Nesse contexto, os aterros sanitários representam uma das principais soluções empregadas para a destinação final dos resíduos sólidos urbanos (RSU), sendo concebidos como estruturas de engenharia destinadas ao confinamento controlado dos resíduos, à minimização de impactos ambientais e à proteção da saúde pública (ABNT, 1992; ABNT, 1997).

Embora os aterros sanitários sejam amplamente utilizados como alternativa técnica para a disposição final de resíduos, sua concepção, operação, monitoramento e encerramento envolvem desafios geotécnicos relevantes. Diferentemente dos solos naturais, os resíduos sólidos urbanos apresentam elevada heterogeneidade, composição variável, estrutura interna complexa e comportamento fortemente dependente do tempo. Essa condição decorre da presença simultânea de materiais orgânicos, recicláveis, inertes e rejeitos, cujas propriedades físicas, mecânicas, hidráulicas e biodegradativas variam conforme a origem dos resíduos, o método de disposição, o grau de compactação, a idade do material, o teor de umidade e as condições climáticas locais (Gomes; Caetano, 2010; Araújo Neto *et al.*, 2017).

Entre os fenômenos geotécnicos mais relevantes associados ao comportamento dos aterros sanitários, destacam-se os recalques. Esses deslocamentos verticais resultam da ação conjunta de diferentes mecanismos, incluindo a compressão mecânica inicial, a fluência ou *creep* mecânico, a biodegradação da fração orgânica, a geração e migração de biogás, a dissipação de fluidos nos vazios e as variações no teor de umidade dos resíduos (Hunte *et al.*, 2012; Reddy; Kumar; Giri, 2018). Devido à interação entre esses processos, os recalques podem ocorrer tanto durante a fase de operação quanto após o encerramento do aterro, influenciando diretamente a estabilidade do maciço, a integridade dos sistemas de drenagem, a funcionalidade da cobertura final e a vida útil da estrutura (Babu *et al.*, 2010; Hadinata *et al.*, 2018; Alves; Masini; Almeida, 2024).

Diante dessa complexidade, diversos modelos de previsão de recalques foram desenvolvidos ao longo das últimas décadas, abrangendo formulações empíricas, semiempíricas, constitutivas, numéricas e acopladas, dentre outras. Os modelos empíricos e semiempíricos, em geral, são baseados no ajuste matemático de dados de campo ou laboratoriais, apresentando aplicação relativamente simples, porém com forte dependência das condições utilizadas em sua calibração (Hettiarachchi, 2012; Klink; Van Elk; Silva, 2021). Os modelos constitutivos buscam representar o comportamento tensão-deformação dos resíduos, incorporando mecanismos mecânicos e, em alguns casos, parcelas associadas à fluência e à biodegradação (Babu *et al.*, 2010; Gao; Kavazanjian Jr., 2022). Já os modelos numéricos e acoplados permitem representar cenários mais complexos, considerando a interação entre processos mecânicos, hidráulicos, biológicos, térmicos e gasosos, especialmente em aterros biorreatores e em estudos de longo prazo (Liu *et al.*, 2011; Kumar; Reddy, 2017; Reddy; Kumar; Giri, 2018; Kumar *et al.*, 2021).

No contexto brasileiro, a modelagem preditiva de recalques torna-se ainda mais relevante em função da limitação de referências técnicas consolidadas voltadas especificamente à previsão e ao monitoramento geotécnico de recalques em aterros sanitários. As normas brasileiras, como a ABNT NBR 8419 (1992), a ABNT NBR 13896 (1997) e a ABNT NBR 15849 (2010), são fundamentais para orientar o projeto, a implantação e a operação dessas estruturas. Entretanto, apresentam abordagem restrita quanto à instrumentação geotécnica, ao acompanhamento sistemático dos recalques, à definição de parâmetros representativos e ao estabelecimento de critérios objetivos para avaliação do comportamento deformacional ao longo do tempo. Além disso, parte desse arcabouço normativo não incorpora avanços recentes relacionados à modelagem acoplada dos processos mecânicos, hidráulicos, térmicos e biodegradativos dos resíduos sólidos urbanos (Hubert; Liu; Collin, 2016; Kumar *et al.*, 2021; Kumar; Reddy; Foster, 2021; Alghazali; Van Geel; Kenny, 2024).

Diante desse contexto, evidencia-se a necessidade de ampliar a compreensão sobre as diferentes abordagens empregadas para a previsão de recalques em aterros sanitários. Embora diversos modelos tenham sido desenvolvidos ao longo das últimas décadas, observa-se que esses estudos se encontram dispersos na literatura e diferem quanto às hipóteses adotadas, aos mecanismos considerados, aos parâmetros utilizados e às formas de validação

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é realizar uma análise crítica dos modelos de previsão de recalques em aterros sanitários reportados na literatura. Como objetivos específicos, busca-se analisar a evolução das abordagens empregadas, identificar os principais parâmetros utilizados e avaliar o desempenho preditivo desses modelos.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos, incluindo esta introdução, de forma a apresentar a metodologia adotada, a fundamentação teórica, os resultados obtidos e discussões associadas e as considerações finais.

O Capítulo 1 apresenta a introdução, contemplando a contextualização do tema, a motivação e relevância da pesquisa, os objetivos e a organização do estudo.

O Capítulo 2 descreve a metodologia adotada, composta por uma revisão bibliográfica, conduzida a partir de etapas sequenciais de busca, seleção, organização e análise de estudos científicos relacionados à previsão de recalques em aterros sanitários.

O Capítulo 3 reúne a fundamentação teórica necessária à compreensão do tema, abordando os resíduos sólidos urbanos, seu comportamento geotécnico, os aterros sanitários, os aterros biorreatores e os modelos de previsão de recalques representativos da presente pesquisa.

O Capítulo 4 apresenta aplicações dos modelos de previsão de recalques identificados na literatura, organizados conforme a abordagem predominante de modelagem: numérica, empírica, constitutiva ou acoplada.

O Capítulo 5 apresenta os resultados e discussões, com análise do panorama geral da produção científica, da evolução temporal dos estudos, dos parâmetros utilizados, do desempenho das abordagens, das limitações e das lacunas identificadas.

Por fim, o Capítulo 6 reúne as conclusões do trabalho, sintetizando os principais resultados obtidos, o atendimento aos objetivos propostos e as contribuições da pesquisa para o estudo dos modelos de previsão de recalques em aterros sanitários.

2 METODOLOGIA

A presente pesquisa foi desenvolvida por meio de uma revisão bibliográfica, conduzida a partir de etapas sequenciais de busca, seleção, organização e análise de estudos científicos relacionados à previsão de recalques em aterros sanitários.

Inicialmente, foi realizada a etapa de levantamento bibliográfico, com a finalidade de identificar publicações relevantes acerca dos mecanismos de recalque em resíduos sólidos urbanos, modelos de previsão de deformações e abordagens experimentais, empíricas, numéricas e constitutivas aplicadas a aterros sanitários. Para isso, foram elaboradas *strings* de busca específicas contendo combinações de palavras-chave relacionadas aos temas “recalques”, “aterros sanitários”, “resíduos sólidos urbanos”, “compressão”, “deformações”, “modelagem” e “previsão de recalques”, por meio de seus correspondentes em língua inglesa, visando ampliar a abrangência dos resultados encontrados.

No Quadro 1 são apresentadas as *strings* de busca, os filtros aplicados e os resultados obtidos na etapa de levantamento bibliográfico. Embora não tenham sido aplicados filtros temporais diretamente nas pesquisas realizadas na plataforma, os resultados obtidos foram organizados em ordem cronológica decrescente, partindo dos estudos mais recentes para os mais antigos. Como critério de delimitação temporal da revisão e para estabelecer um limite para a realização das análises, optou-se pela seleção de trabalhos publicados a partir do ano de 2010. Dessa forma, ao atingir publicações anteriores ao período estabelecido, a etapa de busca correspondente era encerrada. Destaca-se que, pela não adoção de um filtro de delimitação temporal, os resultados encontrados não representam a totalidade dos estudos avaliados na etapa de busca e seleção de referências.

Quadro 1 – *Strings* e filtros aplicados à etapa de busca de artigos

Busca (string)	Filtros	Resultados
("landfill settlement" OR "municipal solid waste settlement" OR "MSW landfill settlement") AND (model* OR prediction OR forecasting OR estimation)	Sem filtros	110

Busca (string)	Filtros	Resultados
("landfill settlement" OR "municipal solid waste settlement" OR "MSW settlement" OR "waste settlement" OR "landfill deformation") AND (model* OR predict* OR estimat* OR forecast*)	Sem filtros	198
("landfill settlement" OR "municipal solid waste settlement" OR "MSW landfill settlement") AND (model* OR prediction OR forecasting OR estimation)	All fields	667
("landfill settlement" OR "MSW settlement") AND (model OR modeling OR prediction OR estimation)	Article title, Abstract, Keywords	127
("landfill settlement" OR "waste settlement" OR "MSW settlement" OR "landfill deformation" OR "waste deformation") AND (model OR modeling OR prediction OR estimation OR simulation OR analysis)	Article title, Abstract, Keywords	234
("municipal solid waste" OR landfill OR "solid waste") AND (settlement OR deformation) AND (model OR modeling OR prediction OR estimation OR analysis)	All fields	1883
("municipal solid waste" OR landfill OR "solid waste") AND (settlement OR deformation) AND (model OR modeling OR prediction OR estimation OR analysis)	Article title, Abstract, Keywords numerical model, Mathematical Models, Finite Element Method, Settlement Of Structures, Creep, Numerical models, Models, Theoretical, Constitutive Models, Mathematical Model, Modeling	377
("landfill settlement" OR "MSW settlement" OR "waste settlement") AND (model* OR predict* OR estimat* OR forecast*) AND (landfill OR "municipal solid waste" OR MSW)	Article title, Abstract, Keywords	184

As buscas bibliográficas foram realizadas exclusivamente na base de dados Scopus, escolhida devido à sua ampla cobertura de periódicos científicos internacionais e relevância acadêmica nas áreas de engenharia geotécnica, ambiental e sanitária.

Com o objetivo de garantir a organização e a rastreabilidade do processo metodológico, foi elaborada uma planilha de controle da revisão bibliográfica, estruturada em diferentes abas destinadas ao registro e sistematização das informações coletadas. A primeira aba foi destinada ao registro da metodologia de busca, contendo informações como: data da pesquisa, *string* de busca aplicada, filtros empregados, número de artigos encontrados e quantidade de trabalhos selecionados para a etapa subsequente.

Adicionalmente, foi elaborada uma segunda aba destinada à triagem inicial dos estudos por meio da análise dos títulos e resumos. Nessa etapa, foram registrados dados essenciais de cada publicação, incluindo: identificação do artigo (ID), título, autores, periódico ou local de publicação, país de origem, ano de publicação, tipo de modelo abordado, palavras-chave, indicação preliminar de relevância para o tema, resumo do trabalho, observações gerais, link de acesso e data de consulta.

A seleção dos artigos foi conduzida inicialmente com base na leitura dos títulos e resumos, buscando identificar estudos compatíveis com os objetivos da pesquisa. Foram mantidos para análise posterior os trabalhos que apresentavam relação direta com a previsão de recalques como mecanismos de recalque, comportamento mecânico e biodegradativo dos resíduos sólidos urbanos, modelagem matemática, modelos constitutivos, modelos empíricos, análises numéricas ou monitoramento de recalques em aterros sanitários. Em contrapartida, estudos que não apresentavam aderência ao escopo da pesquisa foram descartados nesta etapa.

Ao término das etapas de busca, triagem e avaliação dos estudos identificados, foram selecionados 67 artigos para a fase de leitura integral e análise aprofundada. Durante essa etapa, verificou-se que 11 trabalhos, embora relacionados ao contexto dos aterros sanitários e dos resíduos sólidos urbanos, não abordavam diretamente modelos de previsão de recalques, motivo pelo qual foram excluídos da análise comparativa final. Além desses, outros 5 trabalhos selecionados também foram descartados da avaliação final, pois apresentaram comparações entre modelos de previsão de recalques, sem necessariamente aplicá-los. Entretanto, tais estudos foram mantidos como material de apoio para a construção da fundamentação teórica e para o embasamento conceitual da presente pesquisa.

Ainda nessa fase, foi realizada a elaboração de resumos descritivos individuais para cada estudo analisado, buscando contextualizar as metodologias empregadas, os objetivos propostos, os principais resultados obtidos e as contribuições de cada trabalho para o entendimento dos recalques em aterros sanitários. Além disso, foram extraídas e organizadas informações consideradas relevantes para o desenvolvimento do presente Trabalho de Conclusão de Curso, tais como parâmetros geotécnicos e biodegradativos utilizados nos modelos, formulações matemáticas adotadas, hipóteses simplificadoras, variáveis consideradas, metodologias de calibração e validação, principais conclusões dos autores, limitações apontadas nos estudos e referências bibliográficas complementares relevantes ao tema.

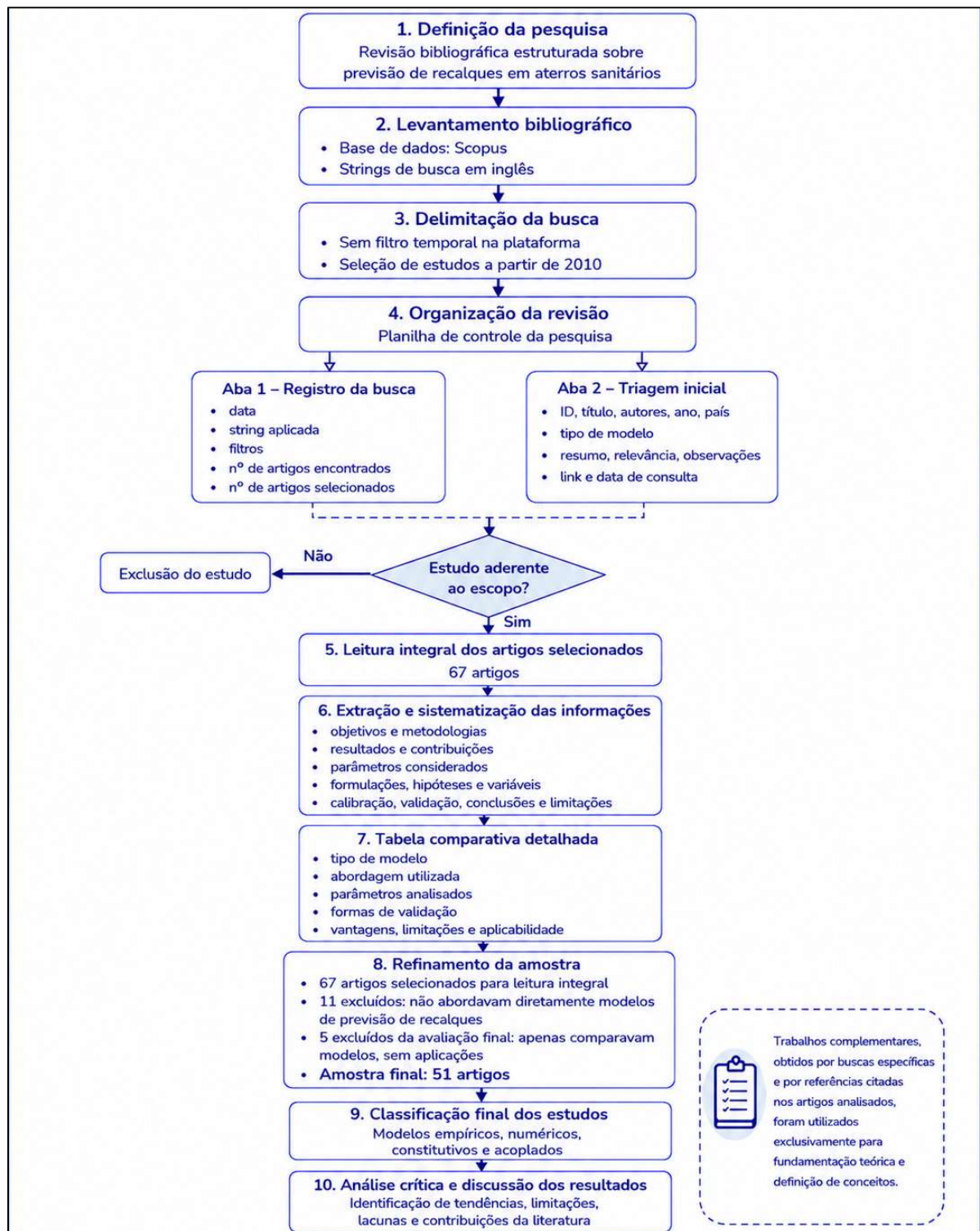
Paralelamente, foi desenvolvida uma tabela comparativa contendo as informações técnicas e metodológicas detalhadas dos artigos selecionados. Essa sistematização permitiu subsidiar a etapa de análise crítica e discussão dos resultados da revisão bibliográfica, possibilitando a identificação das principais tendências, limitações e lacunas existentes na literatura relacionada à previsão de recalques em aterros sanitários.

Dessa forma, a amostra final da revisão bibliográfica foi composta por 51 artigos, os quais foram submetidos ao processo completo de extração, organização e sistematização das informações. Os estudos selecionados foram incorporados à planilha de avaliação detalhada e constituem a base principal das análises desenvolvidas neste trabalho. Para facilitar a interpretação dos resultados e permitir uma análise comparativa mais estruturada, os artigos foram organizados de acordo com o tipo de modelo de previsão de recalques abordado, sendo suas características, aplicações, parâmetros e contribuições discutidos nos capítulos subsequentes.

Destaca-se que, embora a amostra principal da revisão bibliográfica tenha sido composta por 51 artigos diretamente relacionados aos modelos de previsão de recalques em aterros sanitários, também foram utilizados trabalhos complementares, normas e leis para subsidiar a fundamentação teórica e a definição de conceitos necessários ao desenvolvimento da pesquisa. Esses estudos adicionais foram identificados por meio de buscas específicas e de referências relevantes citadas nos artigos analisados, sendo empregados exclusivamente para contextualização, embasamento conceitual e aprofundamento de temas correlatos ao objeto principal do trabalho.

A metodologia adotada na presente pesquisa está ilustrada no fluxograma apresentado na Figura 1, no qual são sintetizadas as etapas realizadas, desde a definição do escopo do trabalho até a análise crítica e a discussão dos resultados.

Figura 1 – Fluxograma da Metodologia Adotada no Presente Estudo



Fonte: elaborado pelo autor (2026).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica deste trabalho tem como objetivo apresentar os principais conceitos e mecanismos envolvidos no comportamento dos resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros sanitários, com foco especial nos processos relacionados à ocorrência e à previsão de recalques.

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

Os resíduos sólidos urbanos constituem o principal material disposto em aterros sanitários, sendo definidos, no Brasil, pela Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) como aqueles provenientes de atividades domésticas em áreas urbanas, bem como os resíduos oriundos da limpeza urbana. De forma complementar, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da ABNT NBR 8419 (1992) delimita os RSU como os resíduos gerados em aglomerados urbanos, excluindo resíduos industriais perigosos, hospitalares sépticos e aqueles provenientes de portos e aeroportos.

Esses resíduos apresentam elevada heterogeneidade, sendo compostos por frações orgânicas, materiais recicláveis e rejeitos, cuja proporção varia em função de fatores socioeconômicos, culturais e regionais. Essa variabilidade influencia diretamente o comportamento físico, químico e biológico dos RSU, tornando sua caracterização um desafio para a engenharia geotécnica e ambiental (Gomes; Caetano, 2010).

No contexto das normas técnicas, a ABNT NBR 13896 (1997) considera os RSU como resíduos não perigosos passíveis de disposição em aterros sanitários, desde que atendidos os critérios de projeto e operação. Já a ABNT NBR 15849 (2010) reforça que, mesmo em sistemas simplificados, as características dos resíduos devem ser consideradas na concepção do aterro, especialmente no que se refere à sua disposição, compactação e controle ambiental.

Além disso, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010) introduz a distinção entre resíduos e rejeitos, sendo estes últimos definidos como a fração que não pode ser reaproveitada ou tratada por processos técnica e economicamente viáveis, devendo ser destinada à disposição final. Essa diferenciação é fundamental para o entendimento do papel dos aterros sanitários dentro da gestão integrada de resíduos.

A natureza heterogênea e degradável dos RSU confere a esses materiais um comportamento particular ao longo do tempo, caracterizado por processos mecânicos e biológicos que resultam

em deformações significativas do maciço de resíduos. Dessa forma, o estudo das propriedades e do comportamento geotécnico dos resíduos sólidos urbanos torna-se essencial para a compreensão dos mecanismos de recalque em aterros sanitários (Chen; Chen; Liu, 2012; Liu *et al.*, 2011).

3.2 COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DOS RESÍDUOS

Do ponto de vista geotécnico, os RSU constituem um material altamente heterogêneo, composto por diferentes frações de resíduos com distintas granulometrias, densidades, resistências e taxas de degradação (Babu; Lakshmikanthan, 2015; Chakma; Mathur, 2012). Essa elevada heterogeneidade representa uma das principais fontes de incerteza na modelagem geotécnica de aterros sanitários (Khoury *et al.*, 2019). Além disso, Jo *et al.* (2023) observaram que resíduos depositados em diferentes períodos apresentam distintos estágios de degradação e acomodação, característica típica de aterros sanitários multiestágio, tornando ainda mais complexa a avaliação do comportamento mecânico da massa aterrada.

Segundo Hadinata *et al.* (2018), os recalques decorrem da compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos e estão diretamente associados à capacidade de armazenamento e à integridade estrutural dos aterros. Diferentemente dos solos convencionais, os autores afirmam que os resíduos apresentam comportamento dependente do tempo, influenciado por fenômenos mecânicos e biodegradativos que atuam simultaneamente ao longo de toda a vida útil do empreendimento.

Segundo Siddiqui, Powrie e Richards (2013), os mecanismos responsáveis pelas deformações dos resíduos podem ser divididos em recalque imediato, compressão primária e compressão secundária. Conforme descrito por Hunte *et al.* (2012), a compressão primária está associada à dissipação de água e gases presentes nos vazios dos resíduos, bem como à reorganização das partículas sob a ação das cargas aplicadas. Já a compressão secundária resulta da combinação entre o *creep* mecânico e os processos de biodegradação da matéria orgânica. Os autores destacam que o *creep* mecânico corresponde às deformações dependentes do tempo que ocorrem sob condições de carregamento aproximadamente constantes, associado à elevada porosidade dos resíduos e à presença de partículas altamente compressíveis, sendo observado em ensaios nos quais os resíduos continuam deformando mesmo após a estabilização das condições de carregamento.

Alghazali, Van Geel e Kenny (2024) verificaram que a rigidez dos resíduos aumenta com o incremento da tensão confinante, reduzindo progressivamente a magnitude dos recalques instantâneos nas camadas mais profundas, evidenciando que as propriedades mecânicas dos resíduos variam significativamente com a profundidade e com o histórico de carregamento do aterro.

Com referência à biodegradação da matéria orgânica, Bente *et al.* (2017) afirmam que a perda de massa sólida decorrente da degradação biológica aumenta a compressibilidade dos resíduos e contribui significativamente para as deformações observadas após o encerramento da disposição. De forma semelhante, Qiu, Li e Sun (2013) destacam que os recalques induzidos pela biodegradação resultam da redução da massa e das alterações volumétricas provocadas pela decomposição da matéria orgânica.

Chen *et al.* (2010) afirmaram que a compressão decorrente da decomposição dos resíduos pode superar significativamente a compressão por *creep* em ambientes propícios à biodegradação. Nesse contexto, fatores ambientais como temperatura e umidade exercem papel determinante na evolução dos recalques.

Liu *et al.* (2011) identificaram forte correlação entre a temperatura dos resíduos e a magnitude dos recalques de longo prazo. De maneira semelhante, Alghazali, Van Geel e Kenny (2024) verificaram que os recalques biodegradativos se tornaram significativos apenas quando a temperatura dos resíduos atingiu valores favoráveis à atividade microbiana, próximos de 10 °C. Em contrapartida, Van Geel e Murray (2015) observaram que a disposição de resíduos sob condições congeladas retarda temporariamente os processos biodegradativos e reduz as taxas iniciais de recalque.

Segundo Champagne *et al.* (2020), o aumento do teor de umidade intensifica a biodegradação e promove o amolecimento da massa de resíduos, contribuindo para maiores taxas de recalque. Da mesma forma, Kumar e Reddy (2017) verificaram que tanto o recalque superficial quanto o tempo necessário para estabilização dos resíduos variam consideravelmente em função das propriedades não saturadas dos RSU, evidenciando a importância das condições hidráulicas no comportamento geotécnico dos aterros.

Além dos fatores ambientais, a composição gravimétrica dos resíduos influencia diretamente os mecanismos de deformação. Chen *et al.* (2020) observaram que resíduos com elevado teor de matéria orgânica, especialmente resíduos alimentares, apresentam estabilização mais rápida

e recalques significativamente maiores quando comparados a resíduos com menor conteúdo biodegradável. O tamanho das partículas também desempenha papel importante, uma vez que Babu e Lakshmikanthan (2015) verificaram que partículas maiores tendem a sofrer fragmentação progressiva durante a degradação, influenciando tanto os recalques imediatos quanto aqueles associados ao *creep*.

Qiu e Sun (2011) observaram que a decomposição da matéria orgânica provoca redução progressiva da rigidez da matriz de resíduos e modifica sua estrutura interna, influenciando significativamente os recalques de longo prazo. Os autores também destacam que os parâmetros de compressibilidade dos resíduos devem variar em função do grau de decomposição e da evolução da produção de gases no interior do aterro sanitário.

3.3 ATERROS SANITÁRIOS

A disposição final de resíduos sólidos constitui uma etapa fundamental da gestão integrada de resíduos, estando diretamente relacionada à proteção ambiental, à saúde pública e ao desenvolvimento sustentável. No Brasil, a Lei nº 12.305/2010 estabelece diretrizes para a gestão e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos, definindo a disposição final ambientalmente adequada como a destinação ordenada dos rejeitos em locais licenciados e preparados para minimizar impactos ao meio ambiente e à saúde da população.

Nesse contexto, o aterro sanitário é amplamente reconhecido como a principal técnica de disposição final de resíduos sólidos urbanos. Segundo a ABNT NBR 8419 (1992), o aterro sanitário consiste em uma técnica de disposição de resíduos no solo que utiliza princípios de engenharia para confiná-los à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, promovendo sua cobertura periódica com material terroso de forma a evitar danos à saúde pública e minimizar impactos ambientais.

Além de sua função como sistema de disposição final, os aterros sanitários são estruturas de engenharia complexas, projetadas para garantir o controle ambiental dos resíduos ao longo de toda sua vida útil. Sharma e Reddy (2004) destacam que os aterros são constituídos por sistemas de impermeabilização de fundo, coleta e remoção de lixiviados, drenagem e controle de gases, além de sistemas de cobertura final destinados a reduzir a infiltração de água e a emissão de contaminantes para o meio ambiente.

Em consonância com essa abordagem, a ABNT NBR 13896 (1997) estabelece critérios técnicos para o projeto, implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos, contemplando aspectos relacionados à seleção de áreas, impermeabilização, drenagem de lixiviados, manejo de gases e monitoramento ambiental. Complementarmente, a ABNT NBR 15849 (2010) apresenta diretrizes específicas para aterros sanitários de pequeno porte, permitindo a adoção de soluções simplificadas sem comprometer os princípios de proteção ambiental e sanitária. A norma também classifica diferentes tipologias construtivas, como aterros em valas, trincheiras, encostas e áreas, evidenciando a versatilidade dessa técnica frente às distintas condições geográficas e operacionais.

3.4 ATERROS SANITÁRIOS BIORREADORES

Os aterros sanitários do tipo biorreator representam uma evolução dos aterros convencionais, sendo considerados uma alternativa mais sustentável para a disposição final de resíduos sólidos urbanos. Sua principal característica consiste na aceleração dos processos de degradação biológica da matéria orgânica presente nos resíduos, promovendo estabilização mais rápida da massa aterrada e reduzindo o tempo necessário para a ocorrência dos recalques associados à decomposição dos materiais (Sharma; Reddy, 2004).

Nesses sistemas, a atividade microbiológica é intensificada com o objetivo de transformar e estabilizar as frações biodegradáveis dos resíduos. O aumento da biodegradação favorece a compactação dos resíduos e contribui para uma redução mais rápida do volume do maciço. Para alcançar esse resultado, uma das técnicas mais utilizadas é a recirculação do lixiviado coletado na base do aterro (Sharma; Reddy, 2004).

De acordo com Hettiarachchi (2012), a recirculação do lixiviado desempenha papel fundamental no funcionamento dos aterros biorreatores, uma vez que contribui para a manutenção de elevados teores de umidade e para o fornecimento de nutrientes essenciais ao metabolismo microbiano. O aumento da disponibilidade de água e nutrientes cria condições favoráveis para uma biodegradação mais eficiente da matéria orgânica, acelerando os processos de estabilização dos resíduos. Como consequência, os recalques tendem a ocorrer de forma mais intensa e em períodos mais curtos quando comparados aos observados em aterros convencionais (Reddy; Kumar; Giri, 2018).

Reddy, Kumar e Giri (2018) destacam que o comportamento dos aterros biorreatores é resultado da interação simultânea de fenômenos hidráulicos, mecânicos e bioquímicos. Esses processos

são complexos e inter-relacionados, influenciando diretamente o desempenho global do aterro. De maneira complementar, Kumar e Reddy (2017) ressaltam que as propriedades não saturadas dos resíduos influenciam a expansão da zona umedecida, a taxa de biodegradação e a resposta mecânica da massa de resíduos, evidenciando a necessidade de considerar a interdependência entre os processos hidráulicos, biológicos e mecânicos para uma estimativa mais precisa do comportamento dos RSU submetidos à recirculação de lixiviado.

Nesse contexto, Hettiarachchi (2012) afirma que a compreensão adequada do comportamento dos recalques é essencial para o planejamento da construção, operação e manutenção desses empreendimentos. Além disso, Hunte *et al.* (2012) destacam que grandes recalques podem comprometer a integridade dos sistemas internos do aterro, provocando deslocamentos em tubulações de recirculação de lixiviado e extração de gases, bem como recalques diferenciais na cobertura final.

Os mecanismos responsáveis pelos recalques em aterros biorreatores envolvem diferentes processos atuando simultaneamente. Segundo Qiu e Sun (2011), as deformações observadas resultam da combinação entre a compressão mecânica inicial dos resíduos, os efeitos de fluência (*creep*) e a biodegradação acelerada decorrente da recirculação de lixiviado. Dessa forma, a previsão adequada dos recalques requer modelos capazes de representar a interação entre esses mecanismos, considerando tanto os aspectos físicos quanto os processos biológicos que governam a evolução da massa de resíduos ao longo do tempo.

Portanto, a interação entre compressão mecânica, *creep*, biodegradação, umidade, temperatura e composição dos resíduos resulta em um comportamento altamente complexo e dependente do tempo, justificando a necessidade de modelos específicos capazes de representar adequadamente a evolução das deformações ao longo da vida útil do aterro (Hunte *et al.*, 2012; Safari; Noorzad; Mamaghani, 2022).

3.5 MODELOS DE PREVISÃO DE RECALQUES

Segundo Gomes e Caetano (2010), a complexidade da previsão de recalques em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos está associada à diversidade dos materiais dispostos, aos diferentes estágios de decomposição, à compressibilidade individual dos constituintes dos resíduos e às variações climáticas regionais. Nesse contexto, diferentes abordagens de modelagem foram desenvolvidas com o objetivo de representar a evolução dos recalques ao longo da vida útil dos aterros sanitários.

Os modelos numéricos consistem na resolução computacional das equações que governam o comportamento dos resíduos sólidos urbanos, utilizando técnicas de discretização espacial e temporal, como elementos finitos ou diferenças finitas. Essas abordagens permitem simular a evolução dos recalques considerando a geometria do aterro, a sequência de disposição dos resíduos, as condições de carregamento e as propriedades dos materiais ao longo do tempo. Em função dessa capacidade de representação, os modelos numéricos têm sido amplamente utilizados para avaliar cenários complexos e analisar o comportamento de aterros sanitários em diferentes condições operacionais (Babu *et al.*, 2010; Gao *et al.*, 2017b; Qiu; Li; Sun, 2013).

Os modelos empíricos de previsão de recalques são desenvolvidos a partir da observação e do ajuste matemático de dados experimentais ou de monitoramento de campo. Essas abordagens utilizam relações estatísticas para representar a evolução dos recalques ao longo do tempo, exigindo, normalmente, um número reduzido de parâmetros de entrada, apresentando aplicação relativamente simples quando comparado a outras metodologias. Entretanto, por serem baseados em ajustes de dados observados, sua capacidade preditiva depende fortemente das condições utilizadas na calibração e pode ser limitada quando aplicados a aterros com características distintas daquelas empregadas em seu desenvolvimento (Hettiarachchi, 2012; Klink; Van Elk; Silva, 2021).

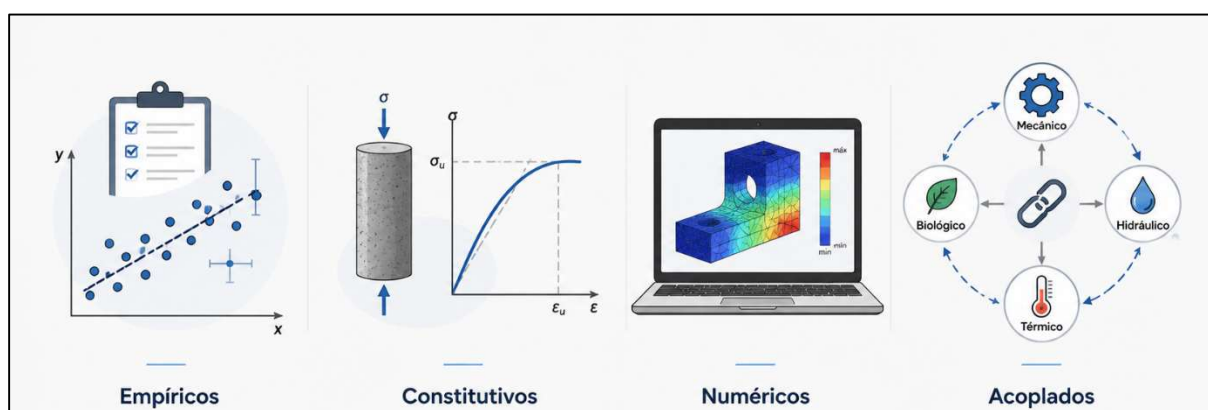
Os modelos constitutivos buscam representar o comportamento mecânico dos resíduos sólidos urbanos por meio de relações tensão-deformação fundamentadas nos princípios da mecânica dos solos. Nesses modelos, os recalques são descritos a partir da resposta mecânica dos resíduos às tensões aplicadas, podendo incluir mecanismos como deformações elásticas, plastificação, *creep* mecânico e compressão induzida pela biodegradação. Dessa forma, procuram representar de maneira mais realista os fenômenos físicos responsáveis pelas deformações observadas em aterros sanitários (Babu *et al.*, 2010; Gao; Kavazanjian Jr., 2022).

Os modelos acoplados representam uma evolução das abordagens tradicionais ao considerar simultaneamente a interação entre diferentes processos que controlam o comportamento dos aterros sanitários. Esses modelos incorporam mecanismos mecânicos, hidráulicos, térmicos, gasosos e biodegradativos, permitindo representar de forma integrada os fenômenos responsáveis pelos recalques de longo prazo. Como os resíduos sólidos urbanos sofrem influência simultânea da compressão mecânica, da biodegradação da matéria orgânica, da geração de gases, da movimentação de fluidos e das condições térmicas, os modelos acoplados tendem a fornecer representações mais realistas da evolução dos recalques, especialmente em

aterros biorreatores e em estudos de longo prazo (Liu *et al.*, 2011; Powrie *et al.*, 2019; Kumar; Reddy, 2017; Reddy; Kumar; Giri, 2018; Chen *et al.*, 2020).

Na Figura 2 são apresentadas, de forma esquemática, as quatro abordagens de modelagem empregadas na previsão de recalques. Os modelos empíricos são representados pelo ajuste de tendências a dados observados. Os modelos constitutivos apresentam relações tensão–deformação que descrevem o comportamento mecânico dos resíduos. A modelagem numérica é representada pela simulação computacional de tensões, deformações, condições geométricas e condições de contorno. Finalmente, os modelos acoplados representam a integração simultânea de diferentes processos, como os mecanismos mecânicos, hidráulicos, biológicos e térmicos.

Figura 2 – Ilustração dos Tipos de Modelos de Previsão de Recalques



Fonte: elaborado pelo autor (2026).

4 MODELOS DE PREVISÃO DE RECALQUES APLICADOS EM ATERROS SANITÁRIOS

Ao longo das últimas décadas, diversos modelos foram desenvolvidos com o objetivo de representar o comportamento deformacional dos maciços de resíduos e estimar a evolução dos recalques ao longo da vida útil e da fase pós-encerramento dos aterros.

Nesse contexto, este tópico apresenta uma revisão dos principais estudos identificados na pesquisa bibliográfica relacionados à modelagem e à previsão de recalques em aterros sanitários, buscando explicitar a abordagem adotada em cada artigo revisado. Os trabalhos analisados foram organizados de acordo com o tipo de abordagem empregada, buscando enquadrá-los na metodologia mais representativa, o que não exclui outras abordagens, isto é, um trabalho pode apresentar mais de um tipo de modelo. Contudo, os 51 artigos selecionados para a revisão final foram enquadrados em quatro grupos, de acordo com a abordagem predominante: 19 trabalhos numéricos, 17 empíricos, 7 constitutivos e 8 acoplados, estes últimos caracterizados pela integração de diferentes mecanismos de recalque.

Para cada artigo selecionado, são apresentados resumos descritivos contendo os principais pontos abordados, podendo incluir objetivos do estudo, metodologias adotadas, parâmetros considerados, formas de validação, principais resultados obtidos e contribuições relevantes para o entendimento dos mecanismos de deformação dos resíduos sólidos urbanos. Essa organização visa subsidiar a análise crítica das metodologias aplicadas à previsão de recalques em aterros sanitários, a ser apresentada no capítulo de Resultados e Discussões.

4.1 MODELOS NUMÉRICOS

Ke *et al.* (2011) desenvolveram um procedimento computacional para simular simultaneamente os processos de disposição em camadas e os recalques em aterros sanitários, utilizando os modelos de Sowers, Marques e Stress Degradation Model. Os parâmetros foram ajustados com base em dados monitorados do Aterro Laogang, em Xangai, sendo observado que o modelo de Sowers apresenta maior simplicidade, porém resultados mais aproximados, enquanto os modelos de Marques e Stress Degradation demonstraram melhor ajuste aos dados de campo. Os autores verificaram que a metodologia reproduziu satisfatoriamente os recalques observados e destacaram que os maiores recalques e recalques diferenciais podem ocorrer no interior do

maciço de resíduos, indicando a necessidade de avaliação das deformações em estruturas internas, sistemas de drenagem de lixiviado e camadas intermediárias.

Liu, Wang e Zhu (2011) analisaram o recalque de um aterro de resíduos sólidos urbanos por meio de métodos normativos (baseiam-se em critérios e parâmetros estabelecidos por normas técnicas), método convencional da mecânica dos solos (utiliza teorias clássicas para estimar deformações e recalques dos materiais) e método dos elementos finitos (emprega modelagem numérica para simular tensões, deformações e deslocamentos). O estudo foi aplicado ao Taxation Waste Landfill, localizado em Hebei Langfang, China, com altura de 30 m. Os autores dividiram o recalque em três estágios: compressão inicial, recalque de longo prazo e recalque por decomposição bioquímica. Os resultados indicaram recalques de 11,57 m pelo método normativo, 4,85 m pelo método convencional e 3,11 m pelo método dos elementos finitos. O método normativo apresentou o maior valor, sendo considerado conservador, enquanto o método convencional forneceu resultado superior ao obtido pelo método dos elementos finitos.

Chen, Chen e Liu (2012) propuseram um modelo unidimensional para previsão de recalques em aterros sanitários de RSU, considerando simultaneamente a compressão mecânica e a biodegradação da matéria orgânica. O modelo foi desenvolvido com base na teoria da consolidação não saturada e no comportamento cinético de biodegradação de primeira ordem, sendo posteriormente resolvido numericamente por diferenças finitas explícitas. A validação foi realizada com dados dos aterros Mission Canyon, nos Estados Unidos, e Sanzhuku, em Taipei. No caso do aterro Mission Canyon, os resultados simulados apresentaram boa concordância com 18 anos de monitoramento de recalques. Para o aterro Sanzhuku, o modelo previu recalque total equivalente a aproximadamente 26,4% da altura da massa de resíduos após a cobertura final, sendo observada predominância da biodegradação nos recalques de longo prazo.

Hunte *et al.* (2012) analisaram o aterro biorreator Calgary Biocell, no Canadá, com o objetivo de coletar dados de campo e validar um modelo multifásico de previsão de recalques. O modelo considerou o aterro como um sistema composto por fases sólida, líquida e gasosa, com variações temporais e espaciais. Foram simulados quatro cenários envolvendo combinações de pressão e umidade constantes ou variáveis. A comparação com os dados de campo indicou que a previsão dos recalques melhora quando os componentes de gás e umidade são incorporados, sendo reportada diferença de 3,9% entre o recalque real e o previsto quando esses componentes foram considerados.

Chakma e Mathur (2012) desenvolveram uma metodologia matemática para estimar a compressão primária e a compressão mecânica em aterros de RSU, considerando a influência da densidade dos resíduos. O estudo comparou cenários com densidade constante e densidade variável no espaço e no tempo. Os resultados demonstraram que a consideração de densidade constante conduz a menores valores de recalque. Para um aterro de 15 m, a compressão primária ao final de 15 anos foi de 3,29 m com densidade variável e 3,05 m com densidade constante. Já a compressão mecânica em 100 anos foi de 1,67 m com densidade variável e 1,22 m com densidade constante, evidenciando a relevância da variação da densidade na estimativa dos recalques.

Qiu, Li e Sun (2013) propuseram um método para previsão de recalques em aterros biorreatores considerando a influência da pressão de gás. O aterro foi simplificado como um campo unidirecional de percolação gasosa e o modelo foi formulado com base na conservação de massa do gás, no tempo de escape gasoso e nas variações de pressão entre o interior do aterro e a atmosfera. O recalque total foi tratado como resultado da combinação entre compressão mecânica e recalque por biodegradação. O modelo foi resolvido pelo método das diferenças finitas e aplicado a um biorreator laboratorial cilíndrico com cinco camadas de resíduos. Os autores concluíram que a geração e a dissipação de gás afetam diretamente o recalque, embora o modelo não incorpore explicitamente o papel da água ou o recalque associado à recirculação de lixiviado.

Chakma e Mathur (2013) desenvolveram um modelo matemático para estimar recalques de longo prazo em aterros de RSU após o encerramento das operações. O modelo calculou separadamente os recalques decorrentes da compressão mecânica e da biodegradação, incorporando, para a parcela biodegradativa, os efeitos da temperatura, do pH, do teor de umidade e da densidade dos resíduos. A validação foi realizada com dados monitorados em um aterro localizado no sul da Califórnia, apresentando concordância considerada satisfatória com os dados observados em campo. Os autores concluíram que a incorporação conjunta desses fatores permite estimativas mais realistas dos recalques de longo prazo.

Reddy, Kumar e Giri (2016) propuseram um modelo numérico acoplado hidro-bio-mecânico para simular o comportamento de aterros sanitários convencionais e biorreatores no período pós-fechamento. O modelo integrou processos hidráulicos, biológicos e mecânicos, permitindo avaliar fluxo de lixiviado, poropressões, degradação anaeróbia, assentamentos, resistência ao cisalhamento e estabilidade. Os resultados mostraram que a recirculação contínua de lixiviado

acelera a degradação dos resíduos, aumenta o grau de saturação e altera propriedades geotécnicas dos RSU. Em aterros biorreatores, os assentamentos máximos ocorreram em aproximadamente 15 a 16 anos, enquanto em aterros convencionais condições semelhantes foram atingidas em cerca de 50 anos.

Reddy *et al.* (2018) investigaram o desempenho de aterros biorreatores considerando as incertezas e a variabilidade espacial das propriedades dos resíduos sólidos urbanos. Para isso, utilizaram um modelo numérico bidimensional acoplado hidro-bio-mecânico, implementado no software FLAC, associado a uma abordagem probabilística com 400 simulações de Monte Carlo. O estudo tratou propriedades geotécnicas dos RSU, como peso específico, porosidade, grau de saturação, condutividade hidráulica e parâmetros de resistência, como variáveis aleatórias distribuídas log-normalmente. Os resultados indicaram recalques totais variando aproximadamente entre 5,3 m e 11 m, correspondentes a deformações verticais da ordem de 17,6% a 36,6%. Os autores concluíram que a consideração das incertezas fornece estimativas mais realistas do comportamento do aterro em comparação com análises determinísticas tradicionais.

Gao *et al.* (2017b) desenvolveram uma metodologia prática para cálculo simultâneo dos recalques e da capacidade de armazenamento de aterros sanitários, com base na discretização espacial e temporal do processo de disposição dos resíduos. O método dividiu o maciço em unidades independentes em forma de colunas, permitindo acompanhar o histórico de deposição de cada camada. A aplicação foi realizada na fase IV do aterro sanitário de Laogang, em Xangai, China. A validação por levantamentos topográficos indicou erro máximo de 2,02% no cálculo do volume geométrico. Quando os recalques não eram considerados, os erros no cálculo do peso acumulado variavam de 12,73% a 32,70%, com a discretização temporal, os erros máximos foram reduzidos para valores inferiores a 5%.

Kumar e Reddy (2017) avaliaram a influência das propriedades hidráulicas não saturadas dos RSU sobre a distribuição de umidade, poropressões e recalques em aterros biorreatores. Para isso, utilizaram uma estrutura numérica acoplada hidro-bio-mecânica, integrando modelo hidráulico bifásico, modelo mecânico bidimensional em deformação plana e modelo de biodegradação de primeira ordem. Os resultados mostraram que diferentes conjuntos de propriedades hidráulicas produziram diferenças nas taxas de umedecimento, biodegradação, recalque e tempo de estabilização do aterro. O estudo concluiu que a previsão do

comportamento dos resíduos deve considerar a interdependência entre processos hidráulicos, biológicos e mecânicos.

Feng *et al.* (2018) desenvolveram um modelo hidro-biodegradativo de dupla permeabilidade para simular o fluxo de lixiviado, a biodegradação e os recalques induzidos pela recirculação de lixiviado em aterros biorreatores. O modelo foi implementado no software OpenFOAM e validado por comparação com soluções do Hydrus-1D e experimentos em escala real. Os resultados mostraram que o fluxo preferencial acelera significativamente o transporte vertical do lixiviado e que maiores taxas de recirculação resultam em maiores recalques no mesmo intervalo de tempo. As simulações indicaram recalques variando aproximadamente entre 3 m e 10 m ao longo de seis anos, dependendo da vazão de recirculação adotada. Os autores concluíram que modelos de porosidade simples tendem a produzir erros significativos na representação do fluxo de lixiviado e dos recalques em RSU heterogêneos.

Reddy, Kumar e Giri (2018) desenvolveram uma estrutura matemática acoplada hidro-bio-mecânica para simular o comportamento de resíduos sólidos urbanos em aterros biorreatores. O modelo integrou um modelo hidráulico bifásico, um modelo de biodegradação e um modelo mecânico, sendo implementado no programa FLAC. A validação foi realizada com experimento laboratorial em grande escala e experimento de campo em escala de lisímetro. Os autores observaram boa concordância entre simulações e resultados experimentais para recalques primários, recalques biomecânicos secundários e variações de umidade. Na aplicação a uma célula típica de aterro biorreator, a recirculação de lixiviado acelerou a estabilização dos resíduos, atingindo recalque total de aproximadamente 26,3% da altura inicial em cerca de 20 anos, enquanto o aterro convencional alcançou recalque semelhante apenas após 60 anos.

Tahmoorian e Khabbaz (2019) analisaram o desempenho de um modelo de previsão de recalques em aterros de RSU aplicado a um aterro localizado em Teerã. O modelo foi baseado na formulação de Hettiarachchi (2005), sendo modificado para considerar a variação temporal dos parâmetros de entrada. O aterro foi tratado como um meio multifásico composto por fases sólida, líquida e gasosa, incorporando os efeitos da compressão mecânica e da biodegradação. A validação utilizou dados de um aterro em escala piloto instrumentado, com monitoramento de recalques, geração de gás e produção de lixiviado durante aproximadamente 872 dias. Os resultados indicaram boa concordância entre valores previstos e medidos, a análise de sensibilidade demonstrou que a altura do aterro e os parâmetros de compressibilidade foram os fatores mais influentes no recalque total.

Berquist e Van Geel (2020) desenvolveram um modelo numérico de recalque induzido por biodegradação dependente da temperatura, denominado TDBI, para simular recalques em aterros localizados em clima frio. O estudo utilizou dados de temperatura e recalque coletados no aterro Ste. Sophie, em Quebec, Canadá. O modelo relacionou o recalque por biodegradação à geração de calor e à energia expendida durante o processo de degradação. Os resultados indicaram que o modelo foi capaz de reproduzir as tendências de recalque observadas em campo. Os autores também avaliaram uma estratégia alternativa de disposição dos resíduos, verificando que a alteração da sequência de disposição poderia resultar em aumento da temperatura, maior energia expendida e recalque adicional estimado de 0,337 m.

Kumar *et al.* (2021) apresentaram o desenvolvimento e a aplicação de um modelo numérico acoplado termo-hidro-bio-mecânico, com o objetivo de simular o comportamento de longo prazo de aterros sanitários de RSU. O modelo integrou processos hidráulicos, mecânicos, biológicos e térmicos, sendo implementado no software FLAC por meio do método das diferenças finitas. A validação foi realizada com dados de temperatura obtidos em campo, apresentando boa concordância, com diferenças geralmente inferiores a 5 °C. Os resultados indicaram que a temperatura exerce influência significativa nos processos de biodegradação e nos recalques ao longo do tempo. Os recalques finais atingiram valores próximos a 6,5 m, com tempos de estabilização entre 16 e 20 anos nos modelos com maior taxa de biodegradação e cerca de 60 anos no aterro convencional, resultados semelhantes aos obtidos no estudo de Reddy, Kumar e Giri (2018).

Safari, Noorzad e Mamaghanian (2022) desenvolveram uma análise numérica por elementos finitos do comportamento termo-hidro-mecânico de aterros biorreatores utilizando o software ABAQUS. O modelo foi elaborado para representar os processos térmicos, hidráulicos e mecânicos que ocorrem durante e após a construção do aterro, sendo validado por meio de dados de campo de uma célula biorreatora localizada em Calgary, Canadá. Após a validação, os autores utilizaram as propriedades de um aterro biorreator em Arlington, Texas, para realizar análises paramétricas envolvendo a geometria do aterro, o módulo de elasticidade da fundação e o coeficiente de expansão térmica dos resíduos. A biodegradação foi representada por um modelo de mudança de fase, no qual as propriedades mecânicas dos resíduos variam ao longo do tempo. Os resultados mostraram que a geometria do aterro e a rigidez da fundação exercem influência significativa sobre os recalques finais, enquanto o coeficiente de expansão térmica apresentou efeito pouco relevante. Além disso, verificou-se que aterros totalmente enterrados

tendem a apresentar recalques superiores aos observados em aterros parcialmente elevados acima do nível do terreno (Safari; Noorzad; Mamaghian, 2022).

Jiang (2024) propôs uma abordagem baseada em inteligência artificial para previsão de recalques em aterros sanitários, utilizando um modelo híbrido que combina Rede Neural de Regressão Generalizada com o algoritmo Harris Hawks Optimizer (HHO-GRNN). O modelo foi aplicado a uma célula de aterro com aproximadamente 30 m de altura, utilizando 32 pontos de dados para treinamento e validação. O desempenho foi avaliado por meio dos indicadores RMSE (raiz do erro quadrático médio), MAE (erro absoluto médio) e MAPE (erro percentual absoluto médio), sendo comparado com outros métodos, como regressão linear múltipla, redes neurais otimizadas, máquinas de vetor de suporte e redes recorrentes. Os resultados indicaram desempenho superior do modelo HHO-GRNN, com RMSE de 0,015, MAE de 0,014 e MAPE de 0,150%, demonstrando elevada precisão na previsão dos recalques.

Por fim, Alghazali, Van Geel e Kenny (2025) propuseram o aprimoramento de um modelo composto para estimativa do assentamento de RSU em aterros sanitários, contemplando as fases de preenchimento e pós-fechamento sob diferentes condições climáticas. O modelo representa uma evolução do modelo de Marques *et al.* (2003), incorporando a dependência da fluência mecânica em relação à tensão aplicada e um parâmetro de tempo de atraso para representar o início da biodegradação em função da temperatura. Para fundamentar a influência térmica, os autores utilizaram um modelo termo-mecânico-biológico implementado no COMSOL Multiphysics. A validação foi realizada com dados do aterro Ste. Sophie, no Canadá, monitorado por mais de uma década. Os resultados indicaram boa concordância entre valores previstos e observados, com redução da superestimação dos recalques e melhor representação da fluência mecânica ao longo do tempo.

O Quadro 2 sintetiza os 19 estudos classificados como numéricos, indicando autoria, contribuição principal e local de aplicação, quando informado.

Quadro 2 – Informações sobre os estudos com abordagem numérica

Autoria	Resumo	País/Local
Ke et al. (2011)	Disposição em camadas, recalques com comparação entre os modelos de Sowers, Marques e Stress Degradation.	Shanghai Laogang Landfill, China.
Liu, Wang e Zhu (2011)	Comparação entre método normativo, mecânica dos solos e elementos finitos.	Hebei Langfang, China.
Chen, Chen e Liu (2012)	Modelo unidimensional por diferenças finitas integrando compressão mecânica e biodegradação.	Taipei, Taiwan; Mission Canyon, Estados Unidos
Hunte et al. (2012)	Modelo multifásico considerando as fases sólida, líquida e gasosa.	Calgary, Canadá.
Chakma e Mathur (2012)	Influência da variação espacial e temporal da densidade sobre a compressão dos resíduos.	Índia – Local não informado pelos autores.
Qiu, Li e Sun (2013)	Modelo por diferenças finitas incorporando os efeitos da geração, pressão e dissipação do biogás.	China
Chakma e Mathur (2013)	Previsão pós-fechamento considerando compressão mecânica, biodegradação, temperatura, umidade, pH e densidade.	Índia - validação no sul da Califórnia, Estados Unidos.
Reddy, Kumar e Giri (2016)	Modelo hidro-bio-mecânico para comparar o comportamento pós-fechamento de aterros convencionais e biorreatores.	Estados Unidos
Gao et al. (2017b)	Discretização espacial e temporal para cálculo simultâneo dos recalques e da capacidade de armazenamento do aterro.	Aterro Sanitário Laogang Fase IV, Xangai, China
Kumar e Reddy (2017)	Influência das propriedades hidráulicas não saturadas sobre umidade, biodegradação e recalques.	Estados Unidos – Local Não informado pelos autores.
Feng et al. (2018)	Modelo de dupla permeabilidade para simular fluxo preferencial, recirculação de lixiviado, biodegradação e recalques.	China
Reddy et al. (2018)	Análise probabilística com simulações de Monte Carlo para representar incertezas e variabilidade espacial dos resíduos.	Illinois, Estados Unidos

Autoria	Resumo	País/Local
Reddy, Kumar e Giri (2018)	Estrutura hidro-bio-mecânica implementada no FLAC e validada com experimentos laboratoriais e de campo.	Validação laboratorial com RSU de biorreatores franceses; validação de campo com Deer Track Bioreactor Experiment; aplicação em célula típica de aterro biorreator.
Tahmoorian e Khabbaz (2019)	Modelo multifásico com parâmetros variáveis no tempo, validado por monitoramento de recalques, gás e lixiviado.	Teerã, Irã
Berquist e Van Geel (2020)	Modelo TDBI para representar recalques induzidos pela biodegradação dependente da temperatura em clima frio.	Aterro Ste. Sophie, Quebec, Canadá.
Kumar et al. (2021)	Modelo termo-hidro-bio-mecânico no FLAC para avaliar a influência da temperatura no comportamento de longo prazo.	Michigan/Illinois – Estados Unidos
Safari, Noorzad e Mamaghanian (2022)	Modelagem por elementos finitos dos efeitos térmicos, hidráulicos, geométricos e mecânicos em aterros biorreatores.	Calgary, Canadá; Arlington, Texas, Estados Unidos.
Jiang (2024)	Modelo híbrido de inteligência artificial HHO-GRNN para previsão dos recalques a partir de dados monitorados.	China
Alghazali, Van Geel e Kenny (2025)	Modelo composto aprimorado para as fases de preenchimento e pós-fechamento, incorporando tensão, creep e temperatura.	Aterro Sanitário Ste. Sophie em Quebec, Canadá

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

4.2 MODELOS EMPÍRICOS

Gomes e Caetano (2010) estudaram a compressibilidade de resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros sanitários de pequeno porte no município de Presidente Lucena, no Rio Grande do Sul. O trabalho teve como objetivo aplicar modelos clássicos de previsão de recalques baseados em conceitos da Mecânica dos Solos e desenvolver um modelo estatístico de regressão linear a partir de dados de monitoramento físico, químico e geotécnico coletados em campo. Os autores aplicaram o modelo de Sowers com adaptações de Bjarngard e Edgers aos dados dos aterros T1 e T2, observando erros significativos quando comparados aos recalques medidos. A partir dos dados do aterro T1, foram desenvolvidos modelos de regressão linear, sendo que o Modelo 2

apresentou o melhor desempenho, com erro médio de 2% no período de monitoramento. Quando aplicado ao aterro T2, o erro foi de 16%, enquanto em um aterro de Catas Altas, Minas Gerais, o erro foi elevado. Assim, os autores concluíram que o modelo estatístico desenvolvido se mostrou mais adequado para aterros de pequeno porte com características semelhantes às de Presidente Lucena.

Gourc, Staub e Conte (2010) desenvolveram um modelo biomecânico unidimensional para previsão de recalques secundários em resíduos sólidos urbanos, separando os recalques mecânicos dos recalques bioquímicos. O recalque mecânico foi associado ao *creep*, enquanto o recalque bioquímico foi relacionado à degradação da matéria orgânica e estimado com base na produção observada de biogás. O estudo utilizou dados experimentais de diferentes montagens em grande escala, incluindo células LGCIE (células biorreatoras experimentais de 1,2 m³), células ELIA (células experimentais de grande escala, cerca de 22 m³) e reatores anaeróbios consolidantes CAR. Os resultados mostraram que a contribuição relativa dos recalques mecânicos e bioquímicos varia conforme o pré-tratamento dos resíduos e as condições operacionais. O modelo apresentou erros relativos finais entre 2,0% e 21,4%, e os autores concluíram que o recalque pode ser considerado um indicador relevante do estado de biodegradação dos resíduos.

Qiu e Sun (2011) apresentaram um modelo de previsão de recalques para aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos com recirculação de lixiviado, considerando simultaneamente os efeitos do *creep* mecânico, da biodegradação acelerada e da alteração das propriedades mecânicas dos resíduos ao longo da decomposição. O modelo foi desenvolvido especificamente para aterros do tipo biorreator, nos quais a recirculação de lixiviado intensifica a degradação biológica e modifica o comportamento de compressibilidade dos resíduos. A deformação total foi representada pela soma da deformação inicial, deformação por *creep* mecânico e deformação biodegradativa. Os autores correlacionaram os parâmetros temporais do modelo com a produção de metano observada em campo e validaram a formulação com dados do aterro sanitário Hangzhou Tianziling, na China. Os resultados mostraram boa concordância entre os recalques previstos e os dados monitorados, evidenciando que a consideração explícita da biodegradação melhora a previsão dos recalques de longo prazo em aterros com recirculação de lixiviado.

Hettiarachchi (2012) analisou o comportamento de recalques de oito células ou *lifts* de aterros biorreatores localizados na América do Norte, incluindo casos no Canadá e nos Estados Unidos.

O autor destacou que a previsão de recalques em aterros é predominantemente empírica e depende fortemente de parâmetros laboratoriais e de campo. O estudo compilou dados do Calgary Biocell, Harrison-MI, Yolo County, New River e Mountain View, comparando-os em escala logarítmica de tempo. A análise indicou que, apesar das diferenças de composição dos resíduos, práticas operacionais e zonas climáticas, as células de aterros biorreatores apresentaram curvas de recalque com formato semelhante. Com base em células comparáveis com alturas entre 12 m e 16 m, o autor propôs uma faixa de valores pós-fechamento para recalques em aterros biorreatores anaeróbios, concluindo que a equação proposta pode ser utilizada como guia para estimativas aproximadas em células comparáveis.

Wong *et al.* (2013) analisaram os recalques de longo prazo em antigos aterros sanitários de Hong Kong destinados a projetos de reabilitação urbana e recreacional, com foco nos aterros de Ngau Chi Wan e Jordan Valley. Os autores dividiram o comportamento temporal dos recalques em cinco estágios: compressão inicial, compressão primária, compressão secundária, decomposição e recalque residual. Com base nas observações de campo, propuseram uma modificação do método de Bjarngard e Edgers, introduzindo um terceiro índice de compressão para representar a fase residual dos recalques. O modelo modificado passou a considerar separadamente os estágios de *creep* mecânico, decomposição ativa e recalque residual, além de incorporar os efeitos de sobrecargas externas decorrentes das obras de reabilitação dos aterros. A partir de aproximadamente 30 anos de monitoramento, os autores concluíram que os recalques de longa duração podem persistir por décadas após o encerramento das operações e que modelos calibrados com dados reais são necessários para previsão adequada do comportamento durante obras de pós-uso.

Bareither e Kwak (2015) avaliaram a capacidade de diferentes modelos de previsão de recalque de resíduos sólidos urbanos a partir de dados reais em escala de campo, utilizando como casos principais o Projeto Piloto de Yolo e o experimento de biorreator Deer Track. A abordagem adotada considerou que o recalque total é composto por compressão imediata, fluência mecânica e biocompressão, sendo necessário que os modelos representem adequadamente esses mecanismos para fornecer previsões confiáveis. A análise do recalque imediato foi realizada por meio de um modelo multicamadas, considerando o empilhamento progressivo dos resíduos. Os resultados indicaram que o índice de compressão obtido por ajuste foi inferior ao estimado por correlações empíricas, evidenciando que o uso direto dessas relações pode superestimar o recalque imediato. Além disso, a introdução de uma tensão de pré-adensamento associada ao

processo de compactação em campo mostrou-se necessária para compatibilizar as previsões com os dados observados.

Van Geel e Murray (2015) investigaram o comportamento dos recalques durante a etapa operacional do aterro sanitário de Ste. Sophie, em Quebec, Canadá, onde parte dos resíduos foi disposta sob condições congeladas. O estudo utilizou dados de doze conjuntos instrumentados distribuídos em dois perfis de resíduos e simulou os recalques por meio de um modelo composto por três mecanismos principais: compressão primária ou instantânea, compressão secundária associada ao *creep* mecânico e recalque induzido pela biodegradação. Os autores verificaram que as condições congeladas retardaram significativamente o início da biodegradação e reduziram temporariamente as taxas de recalque biodegradativo. Com o aumento da temperatura e o descongelamento progressivo das camadas inferiores, observou-se aceleração dos recalques associados à degradação biológica. O modelo apresentou boa concordância com os dados de campo e os autores destacaram que parâmetros obtidos em escala real produzem previsões mais representativas do comportamento de aterros sanitários operacionais.

Sivakumar Babu e Lakshmikanthan (2015) estimaram e separaram os diferentes componentes dos recalques em resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios laboratoriais. A metodologia foi baseada na identificação dos períodos correspondentes à compressão primária, ao *creep* mecânico e à biodegradação, utilizando como critério de separação o tempo necessário para o início da geração de gás em células anaeróbias. Os resultados mostraram que o recalque total observado durante 125 dias de ensaio foi composto por parcelas distintas. Para a amostra com partículas inferiores a 4 mm, a biodegradação representou aproximadamente 60% do recalque total, enquanto para a amostra com partículas inferiores a 10 mm essa contribuição foi de aproximadamente 44%. O *creep* mecânico contribuiu entre 18% e 22% do recalque total. Com os parâmetros experimentais obtidos, os autores estimaram os recalques de um aterro hipotético com 30 m de altura, obtendo recalque total de aproximadamente 10,7 m.

Araújo Neto *et al.* (2017) propuseram um modelo estatístico simples para estimar o recalque de resíduos sólidos urbanos ao longo do tempo, com base em dados experimentais obtidos em um lisímetro construído na Universidade Federal de Campina Grande. O monitoramento foi realizado durante aproximadamente quatro anos, sendo observado que, nos primeiros dias, o comportamento do recalque foi predominantemente não linear, em razão da compressão mecânica inicial. Após cerca de 19 dias, o comportamento passou a apresentar tendência linear, associada à predominância dos processos de biodegradação. A partir da análise estatística dos

dados, foi desenvolvido um modelo de regressão linear simples, com forte correlação entre tempo e recalque. Os resultados indicaram recalque total de aproximadamente 1,1 m ao longo de 1300 dias e os autores destacaram que o modelo é eficiente para previsões em condições semelhantes às do experimento, embora apresente limitações na fase inicial de recalque.

Hadinata *et al.* (2018) avaliaram a compressibilidade de resíduos sólidos urbanos típicos de aterros indonésios, caracterizados por elevado teor de umidade e matéria orgânica. O estudo utilizou três lisímetros preenchidos com três camadas de resíduos, analisando diferentes alturas de camada e composições. Os autores identificaram recalque inicial significativo antes da aplicação de pressão adicional pela camada seguinte, variando entre 10% e 17% da altura inicial. A partir dessa observação, propuseram uma modificação no modelo clássico de Sowers, incluindo um fator de correção inicial associado ao recalque ocorrido antes da adição de novas camadas. Essa modificação reduziu a diferença entre os recalques estimados e medidos de 17%–24%, obtidos com o modelo de Sowers, para valores inferiores a 5% com o modelo modificado.

Adamcová *et al.* (2020) propuseram uma abordagem analítica para a modelagem do deslocamento superficial de aterros de resíduos sólidos urbanos, com base em dados obtidos por monitoramento GNSS em um aterro localizado em Štěpánovice, República Tcheca. O modelo foi desenvolvido por regressão polinomial, a partir de dados reais de deslocamento tridimensional ao longo do tempo, incorporando variáveis espaciais e temporais, além da espessura das camadas de resíduos. Os resultados indicaram que o aterro apresentou uma fase inicial de expansão para camadas de menor espessura, seguida por compressão progressiva ao longo do tempo. Apesar da aplicabilidade prática, os autores reconheceram limitações associadas à ausência de parâmetros físicos e mecânicos detalhados dos resíduos, o que resultou em confiabilidade moderada. Ainda assim, o estudo demonstrou a viabilidade de modelos simplificados baseados em dados de campo e reforçou a importância do monitoramento contínuo para calibração e validação.

Du *et al.* (2021) investigaram o comportamento de recalques no aterro sanitário de Xingfeng, na China, integrando técnicas avançadas de sensoriamento remoto e modelagem empírica. O monitoramento foi realizado com imagens SAR multiplataforma e técnica SBAS-InSAR, permitindo a obtenção de séries temporais de deformação superficial. Os resultados indicaram taxas significativas de recalque, com valores máximos de aproximadamente 0,808 m/ano e comportamento não uniforme ao longo do aterro. Além do monitoramento, os autores aplicaram

um modelo empírico baseado em função hiperbólica para previsão do recalque futuro, estimando recalques finais de até 29,45 m em regiões específicas. A comparação entre valores observados e modelados apresentou coeficientes de correlação superiores a 0,99 e erros médios da ordem de centímetros, embora tenham sido observadas limitações em áreas com comportamento mais complexo.

Jo e Jang (2021) analisaram os recalques de longo prazo em um aterro sanitário municipal multicamadas localizado no Gimpo Metropolitan Landfill, na República da Coreia, utilizando dados monitorados durante 27 anos. O estudo buscou identificar as características dos recalques ao longo da operação e após o encerramento do aterro, bem como determinar o início do recalque residual. Os autores observaram que os resíduos mais antigos das camadas inferiores apresentaram maior biodegradação e maiores recalques em comparação aos resíduos das camadas superiores. A partir do método $\log t$, o recalque residual foi identificado entre 4011 e 5590 dias após o início da disposição, com média de 4448 dias. Considerando a natureza multicamadas do aterro, os autores propuseram que o início do recalque residual fosse avaliado a partir do ponto médio do período de disposição dos resíduos, obtendo média de 3205 dias.

Klink, Van Elk e Silva (2021) apresentaram uma análise comparativa de modelos matemáticos aplicados à previsão de recalques de longo prazo no aterro sanitário de Nova Iguaçu, no Rio de Janeiro, utilizando dados de monitoramento obtidos por marcos superficiais instalados no Vale III do aterro. O monitoramento foi realizado durante aproximadamente 930 dias, entre janeiro de 2015 e agosto de 2017. Os autores avaliaram os modelos de Sowers, Gandola *et al.*, Palma, Ling *et al.* e Oweis, calibrando-os com os dados medidos em campo e utilizando-os para prever recalques em um horizonte de 50 anos. As previsões apresentaram diferenças significativas entre os modelos. Sowers, Meruelo e Ling produziram recalques máximos entre aproximadamente 329 mm e 385 mm, enquanto Gandola *et al.* e Oweis estimaram recalques máximos entre 905 mm e 1085 mm. Os autores concluíram que a previsão de recalques depende fortemente da escolha do modelo matemático e do período de monitoramento utilizado para calibração, recomendando a utilização simultânea de múltiplos modelos para aumentar a confiabilidade das previsões.

Jo e Jang (2022) avaliaram o desempenho de seis modelos de previsão de recalques de resíduos sólidos urbanos utilizando dados monitorados durante 27 anos no Aterro 1 do Gimpo Metropolitan Landfill, na República da Coreia. Os modelos analisados foram a função logarítmica, a lei de *creep* potencial, o método hiperbólico, o modelo de Gibson e Lo, o modelo

de Sowers e o modelo Chen-I, cujos parâmetros foram calibrados por regressão estatística a partir de medições obtidas por placas de recalque instaladas durante a operação e após o fechamento do aterro. Os resultados mostraram que a função logarítmica e a lei de *creep* potencial superestimaram os recalques, apresentando valores aproximadamente cinco a seis vezes superiores aos observados em campo. Por outro lado, os modelos hiperbólico, Gibson e Lo e Chen-I apresentaram melhor concordância com os dados monitorados. Entretanto, o modelo hiperbólico não representou os recalques dependentes da tensão, enquanto o modelo Chen-I apresentou inconsistências nos resultados. Entre os modelos avaliados, o modelo de Gibson e Lo apresentou o melhor desempenho, por representar adequadamente tanto os recalques dependentes da tensão quanto aqueles dependentes do tempo.

Jo *et al.* (2023) propuseram e calibraram um modelo empírico de recalque de longo prazo para resíduos sólidos urbanos em um aterro sanitário multiestágio na Coreia do Sul, utilizando dados de campo monitorados durante 21 anos após o fechamento do aterro. O modelo foi desenvolvido considerando que os mecanismos de fluência mecânica, biocompressão e recalque residual ocorrem simultaneamente em aterros com resíduos dispostos em diferentes períodos. A formulação combina um modelo de decaimento exponencial negativo, empregado para representar o recalque residual, e um modelo log-linear, utilizado para representar os mecanismos combinados de fluência mecânica e biodegradação. Os recalques acumulados variaram entre 5,91 m e 9,06 m ao longo de 21 anos, correspondendo a deformações verticais entre 15,15% e 21,54%. Os resultados mostraram elevada compatibilidade entre recalques simulados e medidos, com razão entre recalque modelado e medido variando entre 98,8% e 100,6%.

Avinash e Mishra (2025) investigaram o comportamento de recalque de resíduos sólidos urbanos em aterros biorreatores por meio da comparação entre diferentes modelos de previsão e dados experimentais obtidos em biorreatores anaeróbios simulados em laboratório. Os autores avaliaram modelos baseados em mecânica dos solos, modelos empíricos, reológicos e modelos que incorporam biodegradação. Os modelos clássicos de mecânica dos solos apresentaram tendência de superestimar os recalques iniciais, enquanto os modelos empíricos e reológicos apresentaram melhor ajuste aos dados experimentais. Com base nas limitações observadas nos modelos existentes, os autores propuseram um modelo empírico aprimorado baseado em taxa de decaimento de primeira ordem, incorporando parâmetros relacionados à biodegradação, produção de biogás e retenção de umidade. O modelo apresentou os melhores resultados

estatísticos entre os avaliados, com coeficientes de determinação superiores a 0,99 e RMSE (raiz do erro quadrático médio) inferiores a 1 para ambos os biorreatores.

O Quadro 3 sintetiza os 17 estudos classificados como empíricos, indicando autoria, contribuição principal e local de aplicação, quando informado.

Quadro 3 – Informações sobre os estudos com abordagem empírica

Autoria	Resumo	Páís/Local
Gomes e Caetano (2010)	Regressão linear baseada em monitoramento de aterros brasileiros de pequeno porte.	Presidente Lucena, Rio Grande do Sul, Brasil.
Gourc, Staub e Conte (2010)	Separação entre creep mecânico e recalque biodegradativo estimado pela produção de biogás.	Grenoble, França; Limay, França; Southampton, Reino Unido.
Qiu e Sun (2011)	Modelo para aterros biorreatores considerando creep, biodegradação e recirculação de lixiviado.	Hangzhou Tianziling, China
Hettiarachchi (2012)	Estimativa aproximada de recalques pós-fechamento a partir de dados de diferentes aterros biorreatores.	América do Norte: Calgary, Canadá; Harrison, Michigan; Yolo County, Califórnia; New River, Flórida; Mountain View, Califórnia.
Wong et al. (2013)	Modelo de longo prazo com estágios de creep, decomposição ativa e recalque residual.	Hong Kong, China
Bareither e Kwak (2015)	Avaliação de modelos de compressão imediata, creep e biocompressão com dados de campo.	Estados Unidos (Yolo County e Deer Track)
Van Geel e Murray (2015)	Influência do congelamento e da temperatura nos recalques mecânicos e biodegradativos.	Ste. Sophie, Quebec, Canadá
Sivakumar Babu e Lakshmikanthan (2015)	Separação experimental das parcelas de compressão primária, creep e biodegradação.	Bangalore, Índia
Araújo Neto et al. (2017)	Regressão linear simples baseada no monitoramento de recalques em lisímetro.	Campina Grande, Brasil
Hadinata et al. (2018)	Modificação do modelo de Sowers para incorporar o recalque ocorrido antes da aplicação de novas camadas.	Bandung, Indonésia.

Autoria	Resumo	Páís/Local
Adamcová et al. (2020)	Regressão polinomial dos deslocamentos superficiais obtidos por monitoramento GNSS.	Štěpánovice
Du et al. (2021)	Monitoramento por InSAR associado a modelo hiperbólico para previsão dos recalques futuros.	Guangzhou, China (Aterro Xingfeng)
Jo e Jang (2021)	Identificação do início do recalque residual com base em 27 anos de monitoramento.	Gimpo Metropolitan Landfill (GML), próximo a Seul, República da Coreia.
Klink et al. (2021)	Comparação de diferentes modelos empíricos calibrados com dados do aterro de Nova Iguaçu.	Nova Iguaçu, Rio de Janeiro, Brasil
Jo e Jang (2022)	Comparação de seis modelos, com melhor desempenho do modelo de Gibson e Lo.	Gimpo Metropolitan Landfill, região de Incheon, Coreia do Sul
Jo et al. (2023)	Modelo empírico combinando creep, biocompressão e recalque residual, calibrado com 21 anos de dados.	Aterro Metropolitano de Gimpo (GML), Coreia do Sul
Avinash e Mishra (2025)	Modelo empírico aprimorado incorporando biodegradação, produção de biogás e retenção de umidade.	India

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

4.3 MODELOS CONSTITUTIVOS

Chen *et al.* (2010) investigaram a compressibilidade de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios laboratoriais de longa duração realizados sob condições com biodegradação inibida e sob condições consideradas ótimas para biodegradação. Os autores desenvolveram um equipamento experimental com controle de temperatura, recirculação de lixiviado, sistema de carregamento, coleta de gás e coleta de líquidos, permitindo avaliar simultaneamente os processos mecânicos e biológicos envolvidos na deformação dos resíduos. Os resultados indicaram que, quando a biodegradação foi inibida, a compressão secundária associada ao *creep* apresentou pequena magnitude. Em contrapartida, sob condições favoráveis à biodegradação, a compressão decorrente da decomposição dos resíduos foi significativamente superior àquela atribuída ao *creep*. Com base nos resultados experimentais, foi proposto um modelo unidimensional de compressão capaz de representar conjuntamente a compressão primária, o *creep* e a biodegradação. O modelo foi aplicado ao aterro de Qizishan, na China, indicando que

a intensificação da biodegradação durante a fase operacional pode aumentar a capacidade do aterro e reduzir os recalques após o encerramento das operações.

Babu *et al.* (2010) apresentaram um modelo constitutivo generalizado para resíduos sólidos urbanos desenvolvido a partir da Mecânica dos Solos em Estado Crítico. O modelo incorpora simultaneamente os efeitos da compressão mecânica, do *creep* mecânico dependente do tempo e da compressão induzida pela biodegradação. A formulação estende o modelo Modified Cam Clay mediante a inclusão de componentes de deformação associados ao *creep* mecânico e à biodegradação, sendo os parâmetros obtidos a partir de ensaios laboratoriais unidimensionais de compressão, ensaios triaxiais e informações disponíveis na literatura. Para demonstrar sua aplicabilidade, os autores simularam um aterro hipotético com 30 m de altura, composto por dez camadas de 3 m, avaliando o comportamento ao longo de 30 anos após o encerramento. Os resultados foram comparados com quatorze modelos previamente publicados, observando-se que as previsões variam significativamente conforme o modelo e os parâmetros adotados. Os autores destacaram ainda que a espessura das camadas de disposição exerce influência significativa sobre os recalques previstos e que o modelo necessita de validação adicional com medições de campo.

Na sequência, o estudo de Sivakumar Babu, Reddy e Chouksey (2011) apresentou uma análise paramétrica aplicada à previsão de recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos, utilizando um modelo constitutivo desenvolvido previamente pelos autores. O modelo considera três mecanismos principais: compressão primária, fluência mecânica dependente do tempo e biodegradação dos resíduos. Foram analisados comparativamente o modelo reológico composto de Marques (2001), o modelo reológico composto modificado de Marques *et al.* (2003) e o modelo constitutivo proposto por Sivakumar Babu *et al.* (2010). Para aplicação dos modelos, foi considerado um aterro típico de 30 m de altura dividido em dez camadas de 3 m. A avaliação dos componentes do recalque indicou que a compressão primária representa aproximadamente 63% a 65% do recalque total, enquanto a fluência mecânica contribui com cerca de 8% a 10% e a biodegradação com aproximadamente 26% a 28%. O estudo paramétrico mostrou que o aumento do índice de compressão, da deformação total biodegradável e da taxa de biodegradação resulta em maiores recalques, enquanto valores elevados do coeficiente de empuxo em repouso e da razão de sobreconsolidação reduzem os recalques previstos. Os autores concluíram que os parâmetros do modelo exercem influência significativa na previsão dos recalques e devem ser selecionados de forma criteriosa.

Posteriormente, Chouksey, Babu e Reddy (2012) apresentaram um modelo constitutivo generalizado para resíduos sólidos urbanos também baseado nos conceitos da Mecânica dos Solos em Estado Crítico. O modelo considera que o recalque total resulta da soma das parcelas associadas às deformações elásticas, plásticas, ao *creep* mecânico e à biodegradação. Para demonstrar sua aplicabilidade, os autores analisaram um aterro típico de 30 m de altura dividido em dez camadas de 3 m. O modelo constitutivo previu recalque total de 9,50 m, enquanto os modelos comparativos de Marques (2001) e Marques *et al.* (2003) estimaram 10,45 m e 8,97 m, respectivamente. Os autores também avaliaram a influência da espessura das camadas de resíduos, verificando que camadas mais espessas resultam em maiores recalques iniciais e finais. Para espessuras variando de 0,5 m a 3,0 m, o recalque final após 30 anos aumentou de 4,3 m para 9,09 m.

Siddiqui, Powrie e Richards (2013) investigaram as características de recalque e degradação de dois resíduos provenientes de tratamento mecânico-biológico, denominados MBT-A1 e MBT-A2. Para isso, utilizaram reatores anaeróbios consolidantes em escala laboratorial, operados com controle de carga vertical, recirculação de lixiviado, monitoramento de recalque, temperatura e produção de biogás. O estudo separou os efeitos de *creep* mecânico e biodegradação por meio de um reator controle, no qual a biodegradação foi inibida, e um reator teste, no qual foi estimulada a atividade metanogênica. O recalque foi dividido em três estágios: imediato, primário e secundário, sendo este último associado ao *creep* mecânico e à biodegradação. Os autores avaliaram modelos simples desacoplados para estimar recalques por consolidação, *creep* e biodegradação, concluindo que as curvas de recalque secundário dos resíduos MBT podem ser reproduzidas por um modelo simples que combina *creep* logarítmico e recalque por biodegradação com decaimento exponencial.

Gao *et al.* (2017a) propuseram o modelo denominado Equivalent-time-lines model para previsão de recalques em resíduos sólidos urbanos, fundamentado nas características de compressibilidade dos resíduos e na teoria viscoplástica aplicada originalmente a argilas. O modelo considera que a deformação total dos resíduos é composta por deformação elástica recuperável, deformação plástica independente do tempo e deformação viscosa dependente do tempo, sendo esta última responsável por incorporar simultaneamente os efeitos do *creep* mecânico e da biodegradação. A formulação foi dividida em dois tipos: o Tipo I, destinado a aterros com biodegradação intensificada, elevada fração orgânica, resíduos jovens ou condições favoráveis à degradação acelerada e o Tipo II, voltado a aterros com biodegradação limitada,

baixa fração orgânica, resíduos antigos ou predominância de *creep* mecânico. A validação foi realizada com dados laboratoriais e de campo disponíveis na literatura, incluindo ensaios sob recirculação de lixiviado, condições anaeróbicas controladas, resíduos mecanicamente tratados e experimentos em lisímetros de grande escala. Os resultados simulados apresentaram boa concordância com os dados monitorados, com coeficientes de determinação geralmente superiores a 0,90. Os autores destacaram que o modelo permite unificar análises sob carregamento constante e carregamentos em múltiplos estágios, além de prever recalques convergentes para valores finitos.

Por fim, Gao e Kavazanjian Jr. (2022) apresentaram um modelo constitutivo para previsão do comportamento tensão–deformação–tempo de resíduos sólidos urbanos, considerando simultaneamente compressão mecânica imediata, fluência mecânica dependente do tempo e compressão induzida por biodegradação. O modelo foi desenvolvido a partir do arcabouço da Mecânica dos Solos em Estado Crítico, utilizando como base o modelo Modified Cam-Clay e incorporando os efeitos de endurecimento e amolecimento decorrentes da fluência mecânica e da degradação da massa sólida dos resíduos. A formulação considera que a deformação volumétrica total é composta por deformações elásticas independentes do tempo, deformações plásticas independentes do tempo e deformações plásticas dependentes do tempo, divididas em fluência mecânica e biodegradação. O modelo foi implementado no programa FLAC por meio de sub-rotina numérica e avaliado com dados laboratoriais e de campo. Os resultados indicaram boa capacidade de previsão dos recalques verticais de longo prazo, embora os deslocamentos horizontais tenham sido significativamente subestimados. Os autores concluíram que o modelo apresenta potencial para previsão de recalques e avaliação do desempenho de subsistemas de aterros sanitários, destacando a elevada sensibilidade das previsões ao parâmetro cinético de biodegradação.

O Quadro 4 sintetiza os 7 estudos classificados como constitutivos, indicando autoria, contribuição principal e local de aplicação, quando informado.

Quadro 4 – Informações sobre os estudos com abordagem constitutiva

Autoria	Resumo	País/Local do estudo
Chen et al. (2010)	Modelo unidimensional integrando compressão primária, creep mecânico e biodegradação.	Hangzhou, China (ensaios laboratoriais) e aterro de Qizishan, Suzhou, China (estudo de caso).
Babu et al. (2010)	Modelo baseado no Estado Crítico e no Modified Cam Clay, incorporando compressão, creep e biodegradação.	Aterro hipotético utilizado para análise. Instituições envolvidas: Indian Institute of Science (Índia) e University of Illinois at Chicago (Estados Unidos).
Sivakumar Babu, Reddy e Chouksey (2011)	Análise paramétrica da influência das propriedades mecânicas e biodegradativas nos recalques.	Índia
Chouksey, Babu e Reddy (2012)	Modelo em Estado Crítico considerando deformações elásticas, plásticas, creep e biodegradação.	India, local não informado pelos autores.
Siddiqui, Powrie e Richards (2013)	Modelo para resíduos mecanicamente tratados combinando creep logarítmico e biodegradação exponencial.	Sul da Inglaterra para MBT-A1; Norte da Alemanha para MBT-A2.
Gao et al. (2017a)	Modelo das linhas de tempo equivalentes para representar deformações elásticas, plásticas e viscosas.	Hangzhou, China; Chongqing, China; além de validações com estudos internacionais
Gao e Kavazanjian Jr. (2022)	Modelo tensão–deformação–tempo com endurecimento e amolecimento por creep e biodegradação.	China; Wisconsin e Califórnia (Estados Unidos)

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

4.4 MODELOS ACOPLADOS

Liu *et al.* (2011) apresentaram um modelo unidimensional acoplado mecânico-hidráulico-gasoso para previsão de recalques em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, incorporando simultaneamente os efeitos da compressão mecânica, fluxo de líquidos, geração e dissipação de gases e biodegradação da matéria orgânica. O modelo foi desenvolvido com o objetivo de representar o comportamento dependente do tempo dos recalques em aterros sob condições de biodegradação anaeróbia. A formulação considera que os recalques são controlados pela interação entre tensões mecânicas, poropressão gasosa, poropressão líquida e degradação bioquímica dos resíduos. Para validação, foram realizados ensaios laboratoriais em um lisímetro cilíndrico com resíduos sintéticos, monitorando recalques, poropressão gasosa e poropressão líquida ao longo de aproximadamente 100 dias. Os resultados indicaram boa concordância entre os dados experimentais e as previsões do modelo. O recalque total previsto após 100 dias foi de 11,47 cm, dos quais 7,03 cm corresponderam ao recalque biodegradativo e 4,44 cm ao recalque associado aos efeitos mecânicos acoplados. Os autores concluíram que o modelo apresenta capacidade de representar simultaneamente os efeitos mecânicos, hidráulicos, gasosos e biodegradativos, embora ainda necessite de calibração adicional com dados de campo.

Simões e Catapreta (2012) apresentaram o monitoramento e a modelagem dos recalques de longo prazo em um aterro experimental de resíduos sólidos urbanos localizado em Belo Horizonte, Brasil. O trabalho avaliou o desempenho dos modelos reológico, hiperbólico e composto com base em dados obtidos durante seis anos de monitoramento contínuo. O aterro experimental foi constituído por seis células preenchidas com resíduos dispostos sob diferentes condições operacionais e de compactação. Os resultados mostraram que os recalques observados após seis anos atingiram deformações verticais de até 31% nas células monitoradas. Quando calibrados com apenas um ano de dados, todos os modelos subestimaram significativamente os recalques futuros. Com três anos de monitoramento, as previsões tornaram-se mais próximas dos dados reais, especialmente para o modelo composto. Os autores observaram que os modelos reológico e hiperbólico tenderam a indicar estabilização precoce dos recalques, enquanto o modelo composto apresentou melhor aderência aos dados monitorados, principalmente por considerar deformações mecânicas primárias, compressão secundária e recalques biodegradativos.

Datta, Ering e Babu (2015) analisaram a previsão de recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos incorporando explicitamente as incertezas associadas às propriedades do material. A modelagem foi baseada em um modelo de compressibilidade composto, no qual o comportamento é decomposto em compressão imediata, fluência mecânica dependente do tempo e biocompressão associada à degradação biológica da matéria orgânica. A formulação, baseada em Marques *et al.* (2003), considera o aterro como um sistema estratificado em múltiplas camadas, sendo o recalque total obtido pela soma das deformações de cada camada ao longo do tempo. Para tratar as incertezas dos resíduos, os autores aplicaram o método de superfície de resposta, seguido de análise probabilística pelo Método de Confiabilidade de Primeira Ordem. Os resultados indicaram que a variabilidade dos parâmetros exerce forte influência na previsão de recalques, sobretudo os parâmetros associados à fluência mecânica e à biodegradação. As equações de superfície de resposta apresentaram elevado ajuste estatístico, com R^2 entre 0,995 e 0,998 para baixos coeficientes de variação, evidenciando sua capacidade de representar o comportamento do recalque ao longo do tempo.

Hubert, Liu e Collin (2016) desenvolveram um modelo numérico acoplado termo-hidro-bio-químico-mecânico para simular o comportamento de longo prazo de resíduos sólidos urbanos em aterros do tipo biorreator. O modelo integra fluxo de água em meio não saturado, transporte de espécies químicas, reações bioquímicas anaeróbias, transferência de calor e comportamento mecânico dos resíduos. A biodegradação altera progressivamente as propriedades mecânicas do material por meio de um processo de amolecimento bioquímico, aumentando os recalques sob carregamento constante. Os resultados mostraram forte dependência entre recalques e biodegradação. Na condição de referência, os recalques finais ultrapassaram 1 m após 15 anos de operação pós-encerramento. Quando a taxa de injeção de água foi aumentada, quase toda a matéria orgânica foi degradada ao longo de 15 anos, e os recalques ultrapassaram 2 m. O estudo demonstrou que o teor de umidade é o principal fator controlador dos recalques induzidos por biodegradação, uma vez que o aumento da saturação acelera a degradação da matéria orgânica e eleva os recalques acumulados.

Bente *et al.* (2017) apresentaram um modelo para descrição dos recalques induzidos pela biodegradação como parte de um modelo acoplado térmico-hidráulico-mecânico-químico para aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. O trabalho foi desenvolvido com formulação de grandes deformações, visando representar simultaneamente os processos mecânicos, hidráulicos, térmicos e bioquímicos que controlam o comportamento de longo prazo dos

aterros. A formulação considera que a decomposição da matéria orgânica reduz a densidade da fase sólida e aumenta a compressibilidade do resíduo, favorecendo a ocorrência de recalques secundários e de longo prazo. A validação foi realizada com experimentos em lisímetros do tipo Consolidating Anaerobic Reactor, nos quais foram monitorados recalques, produção de gás e comportamento hidráulico durante 919 dias. Os resultados mostraram boa concordância entre recalques observados e simulados, especialmente nos primeiros 100 dias de ensaio. Na aplicação em escala real, os cenários com maior conteúdo inicial de matéria orgânica apresentaram recalques finais de aproximadamente 26% e 34% da altura inicial do maciço, enquanto cenários sem degradação significativa apresentaram recalques da ordem de 12% após 27 anos.

Chen *et al.* (2020) desenvolveram um modelo numérico acoplado degradação–consolidação para analisar o comportamento de estabilização de resíduos sólidos urbanos aterrados, considerando simultaneamente processos mecânicos, hidráulicos, bioquímicos e de transporte multifásico. O modelo incorpora o acoplamento entre deformação do esqueleto sólido, fluxo de água nos poros, fluxo de gás, transporte de solutos e degradação bioquímica da matéria orgânica. A solução numérica foi realizada com o OpenGeoSys para os processos de deformação, fluxo multifásico e transporte de solutos, enquanto os processos bioquímicos foram resolvidos com o ZJU Calculator. Os resultados mostraram que os recalques são fortemente influenciados pela degradação da massa sólida e pela drenagem do lixiviado. Nos resíduos com alto teor de resíduos alimentares, aproximadamente 80% da massa degradável foi hidrolisada nos primeiros três anos, resultando em rápida evolução dos recalques e redução acelerada da porosidade. Os autores concluíram que o modelo é capaz de representar adequadamente os processos de estabilização e recalques, especialmente em aterros com elevado teor de matéria orgânica biodegradável.

Kumar, Reddy e Foster (2021) propuseram um modelo mecânico elasto-visco-bio-plástico para previsão de recalques de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários. O modelo considera a deformação total como a soma das parcelas elástica, viscoplástica e induzida pela biodegradação. A compressão volumétrica por carregamento, o comportamento ao cisalhamento, a resistência à tração e o *creep* dependente do tempo foram representados pelo modelo *soft soil creep*. A compressão associada à decomposição dos resíduos foi modelada por analogia com deformações induzidas por umedecimento observadas em aterros compactados com solos expansivos. O modelo foi implementado no contexto de um modelo acoplado termo-

hidro-bio-mecânico e validado com dois experimentos laboratoriais de longo prazo realizados em reatores anaeróbios consolidantes. Os resultados simulados apresentaram boa concordância com os recalques medidos. Na aplicação em escala real, observou-se que a injeção de lixiviado acelerou a degradação dos sólidos biodegradáveis e aumentou significativamente os recalques, sendo que o recalque induzido pela biodegradação representou mais de 90% do recalque total nas simulações.

Por fim, Alghazali, Van Geel e Kenny (2024) analisaram 12 anos de dados de recalque coletados durante as fases de operação e pós-fechamento do aterro sanitário Ste. Sophie, localizado em Québec, Canadá, associados ao desenvolvimento de um modelo termo-mecânico-biológico implementado no COMSOL Multiphysics. O estudo evidenciou que a deposição de resíduos sob condições de congelamento influencia diretamente a evolução dos recalques induzidos pela biodegradação. As três primeiras camadas de resíduos foram lançadas durante o inverno canadense, apresentando temperaturas iniciais entre 1,0 °C e 1,7 °C, o que retardou os processos biodegradativos e os recalques associados. O modelo integra um modelo viscoelástico Kelvin-Voigt Generalizado, responsável pela simulação dos recalques instantâneos e da fluência mecânica, a um modelo térmico-biológico baseado na geração de calor decorrente da biodegradação. Os resultados demonstraram boa concordância entre os recalques simulados e os dados monitorados em campo, tanto para os recalques instantâneos quanto para os recalques de longo prazo associados à fluência mecânica e à biodegradação.

O sintetiza os 8 estudos classificados como acoplados, indicando autoria, contribuição principal e local de aplicação, quando informado.

Quadro 5 sintetiza os 8 estudos classificados como acoplados, indicando autoria, contribuição principal e local de aplicação, quando informado.

Quadro 5 – Informações sobre os estudos com abordagem de modelos acoplados

Autoria	Resumo	País/Local do estudo
Liu et al. (2011)	Modelo mecânico-hidráulico-gasoso integrando compressão, fluxos de líquidos e gases e biodegradação.	China

Autoria	Resumo	País/Local do estudo
Simões e Catapreta (2012)	Comparação de modelos reológico, hiperbólico e composto com seis anos de monitoramento em aterro experimental.	Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil
Datta, Ering e Babu (2015)	Análise probabilística das incertezas dos parâmetros de compressão imediata, creep e biocompressão.	Estudo teórico com base em dados da literatura - Índia
Hubert, Liu e Collin (2016)	Modelo termo-hidro-bioquímico-mecânico para avaliar a influência da umidade e da biodegradação nos recalques.	Simulação representativa de aterro bioreator baseada em parâmetros da literatura - Bélgica
Bente et al. (2017)	Modelo térmico-hidráulico-mecânico-químico considerando grandes deformações e amolecimento pela biodegradação.	Alemanha (Technische Universität Braunschweig)
Chen et al. (2020)	Modelo degradação-consolidação integrando deformação, fluxos multifásicos, transporte de solutos e processos bioquímicos.	China
Kumar, Reddy e Foster (2021)	Modelo elasto-visco-bio-plástico incorporado a uma estrutura termo-hidro-bio-mecânica.	Resíduos de aterro no Reino Unido para validação laboratorial; célula típica de aterro simulada numericamente.
Alghazali, Van Geel e Kenny (2024)	Modelo termo-mecânico-biológico para representar os efeitos da temperatura, do congelamento, do creep e da biodegradação.	Aterro sanitário Ste. Sophie, Québec, Canadá

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 PANORAMA GERAL E EVOLUÇÃO TEMPORAL DA LITERATURA ANALISADA

Este tópico apresenta um panorama geral das produções científicas analisadas, com o objetivo de identificar a distribuição temporal e geográfica dos 51 estudos apresentados no item 4 do presente trabalho, bem como a evolução das abordagens empregadas na previsão de recalques em aterros sanitários.

Na Figura 3 apresenta-se a distribuição temporal dos 51 estudos selecionados. Observa-se que as publicações se encontram distribuídas entre os anos de 2010 e 2025, evidenciando o interesse contínuo da comunidade científica pela previsão de recalques em aterros sanitários. O maior número de publicações foi observado em 2012, com seis estudos, enquanto 2014 não foi encontrado nenhum estudo com foco na previsão de recalques. Apesar das oscilações observadas ao longo do período analisado, verifica-se uma produção relativamente constante, indicando a permanência do tema como objeto de investigação ao longo dos últimos quinze anos.

Figura 3 – Distribuição temporal dos estudos avaliados

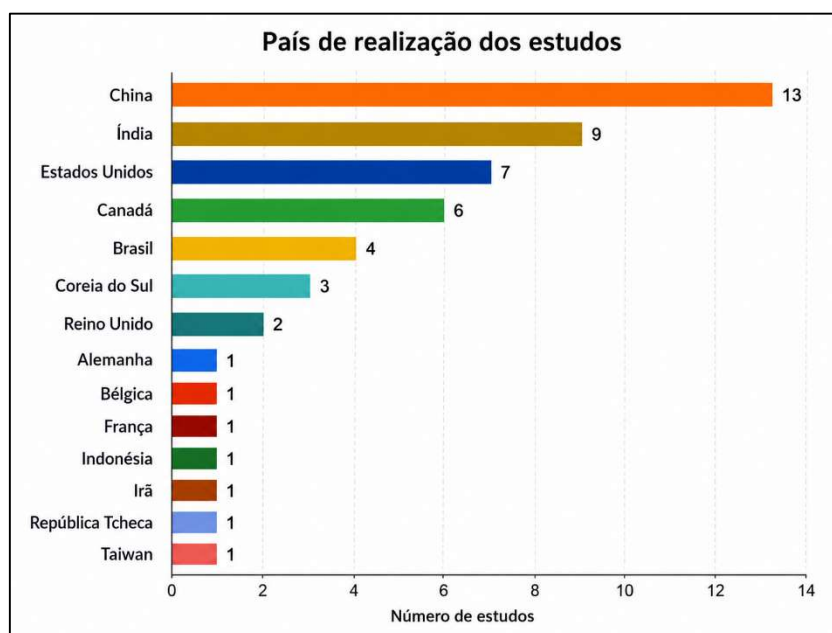


Fonte: elaborado pelo autor (2026).

A distribuição geográfica dos estudos é apresentada na Figura 4. Observa-se predominância de pesquisas desenvolvidas na China, responsável por 13 dos trabalhos analisados, seguida pela

Índia (9 estudos), Estados Unidos (7 estudos), Canadá (6 estudos) e Brasil (4 estudos). Uma possível explicação para essa concentração das pesquisas nesses países pode estar associada à existência de grandes aterros sanitários monitorados, à disponibilidade de dados de campo e ao desenvolvimento de grupos de pesquisa especializados na modelagem do comportamento de resíduos sólidos urbanos. Dessa forma, evidencia-se a necessidade de ampliação das pesquisas em diferentes contextos geográficos e operacionais.

Figura 4 – País de realização dos estudos analisados



Fonte: elaborado pelo autor (2026).

A evolução dos tipos de modelos empregados ao longo do período analisado pode ser observada no Quadro 6.

Quadro 6 – Relação de tipos de modelo por ano de publicação

Ano	Acoplado	Constitutivo	Empírico	Numérico	Total
2010	0	2	2	0	4
2011	1	1	1	2	5
2012	1	1	1	3	6
2013	0	1	1	2	4
2015	1	0	3	0	4
2016	1	0	0	1	2
2017	1	1	1	2	5
2018	0	0	1	3	4
2019	0	0	0	1	1
2020	1	0	1	1	3
2021	1	0	3	1	5
2022	0	1	1	1	3

Ano	Acoplado	Constitutivo	Empírico	Numérico	Total
2023	0	0	1	0	1
2024	1	0	0	1	2
2025	0	0	1	1	2
Total	8	7	17	19	51

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

A análise cronológica dos estudos evidencia uma evolução contínua da complexidade dos modelos de previsão de recalques. Nos trabalhos publicados entre 2010 e 2013 predominavam formulações voltadas à representação dos mecanismos clássicos de compressão mecânica, fluência mecânica (*creep*) e biodegradação dos resíduos, utilizando predominantemente parâmetros geotécnicos convencionais, como índice de vazios, parâmetros de compressibilidade, densidade e tensão aplicada (Babu *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2010; Babu; Reddy; Chouksey, 2011; Chouksey; Babu; Reddy, 2012). Embora alguns estudos já reconhecessem a influência da produção de biogás sobre os recalques, sua representação era frequentemente indireta, sendo incorporada por meio de parâmetros associados à biodegradação ou à perda de massa orgânica (Gomes; Caetano, 2010; Babu *et al.*, 2010). Nesse período, temperatura e teor de umidade eram geralmente empregados como condições experimentais ou parâmetros iniciais, sem que sua evolução temporal fosse representada de forma explícita.

Entre 2015 e 2018 observa-se uma expansão significativa das abordagens empregadas. Estudos desenvolvidos por Bareither e Kwak (2015), Hubert, Liu e Collin (2016), Reddy, Kumar e Giri (2016), Kumar e Reddy (2017), Reddy *et al.* (2018), Bente *et al.* (2017), Reddy, Kumar e Giri (2018) e Feng *et al.* (2018) passaram a incorporar simultaneamente processos relacionados ao fluxo de líquidos, fluxo de gases, biodegradação, geração de metano, distribuição de umidade, poropressões e alterações das propriedades geotécnicas dos resíduos. Nesse período, a geração de biogás deixou de ser tratada apenas como consequência da biodegradação e passou a constituir um dos mecanismos centrais de diversas formulações. Paralelamente, os modelos passaram a empregar parâmetros relacionados à saturação, porosidade, condutividade hidráulica saturada e não saturada, potencial bioquímico de metano e propriedades hidráulicas dos resíduos, refletindo uma tentativa crescente de representar de forma mais realista os processos que governam os recalques.

A partir de 2019 verifica-se a consolidação das abordagens multifásicas (considera fases da matéria: sólida, líquida ou gasosa) presentes no aterro e multifísicas (considera processos físicos, como mecânica, hidráulica e térmica). Tahmoorian e Khabbaz (2019) passaram a

representar explicitamente os resíduos como um meio trifásico constituído por sólidos, líquidos e gases, considerando simultaneamente compressão mecânica, biodegradação, geração de gás, transporte de lixiviado e distribuição de umidade. Posteriormente, Chen *et al.* (2020) ampliaram essa abordagem ao integrar deformação do esqueleto sólido, fluxo de água, fluxo de gás, transporte de solutos e biodegradação em uma única formulação acoplada. Nesse mesmo período, Berquist e Van Geel (2020) incorporaram a influência da temperatura sobre os processos biodegradativos e sobre a evolução dos recalques, evidenciando a crescente importância dos fenômenos térmicos na modelagem dos aterros sanitários.

Os avanços mais expressivos foram observados nos estudos mais recentes. Kumar *et al.* (2021) desenvolveram uma abordagem termo-hidro-bio-mecânica acoplada (CTHBM), integrando simultaneamente escoamento de fluidos, comportamento mecânico, biodegradação, geração de metano e transferência de calor. Posteriormente, Kumar, Reddy e Foster (2021), Safari, Noorzad e Mamaghanian (2022), Gao e Kavazanjian Jr. (2022), Alghazali, Van Geel e Kenny (2024) e Avinash e Mishra (2025) passaram a incorporar fenômenos ainda mais complexos, como dependência térmica da biodegradação, expansão térmica, mudança de fase, comportamento não linear dos resíduos, heterogeneidade espacial e temporal dos parâmetros e influência da sequência construtiva das camadas. Nesses estudos, temperatura e umidade passaram a ser tratadas como variáveis dinâmicas fundamentais para a previsão dos recalques, influenciando diretamente a geração de biogás, a degradação da matéria orgânica e a evolução das propriedades mecânicas dos resíduos.

5.2 CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS E PARÂMETROS UTILIZADOS

Enquanto o item 5.1 discutiu a evolução temporal das abordagens, este tópico analisa as características internas dos modelos, com foco nos mecanismos considerados, nos parâmetros empregados e nos dados necessários à aplicação das formulações.

5.2.1 MECANISMOS CONSIDERADOS PELOS MODELOS

A análise dos estudos selecionados demonstra que os modelos de previsão de recalques em aterros sanitários buscam representar diferentes mecanismos responsáveis pelas deformações observadas ao longo da vida útil dos empreendimentos. De forma geral, os mecanismos mais frequentemente considerados podem ser agrupados em compressão mecânica, fluência mecânica (*creep*), biodegradação, geração de biogás, processos hidráulicos associados à umidade e ao fluxo de lixiviado e, mais recentemente, processos térmicos. A presença e o nível

de detalhamento desses mecanismos variam conforme o tipo de modelo adotado, a disponibilidade de dados e os objetivos de cada estudo.

A compressão mecânica constitui o mecanismo mais recorrente entre os modelos analisados, estando presente em praticamente todas as formulações independentemente da abordagem empregada. Esse mecanismo está associado à redução do volume dos resíduos em função da aplicação de cargas provenientes das camadas sobrejacentes e do próprio processo de disposição dos resíduos. Diversos estudos incorporaram a compressão mecânica por meio de conceitos de compressão primária, compressão imediata, consolidação ou comportamento elastoplástico, utilizando parâmetros geotécnicos convencionais, como índice de vazios, densidade, tensão vertical e coeficientes de compressibilidade (Babu *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2011; Chouksey; Babu; Reddy, 2012; Bareither; Kwak, 2015; Gao *et al.*, 2017a; Avinash; Mishra, 2025).

Além da compressão mecânica, a fluência mecânica (*creep*) foi identificada como um dos mecanismos mais frequentemente incorporados aos modelos. Esse processo é utilizado para representar as deformações dependentes do tempo que continuam ocorrendo mesmo após a dissipação dos recalques iniciais. Nos estudos analisados, o *creep* aparece sob diferentes denominações, incluindo fluência mecânica, compressão secundária e deformações dependentes do tempo, sendo particularmente importante para a previsão dos recalques de longo prazo. Modelos desenvolvidos por Babu *et al.* (2010), Ke *et al.* (2011), Qiu e Sun (2011), Wong *et al.* (2013), Bareither e Kwak (2015), Gao *et al.* (2017a), Jo *et al.* (2023) e Alghazali, Van Geel e Kenny (2025) incorporam explicitamente esse mecanismo em suas formulações.

A biodegradação também se destaca como um dos mecanismos predominantes nos modelos avaliados. Esse processo está relacionado à decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos, resultando na perda de massa sólida, redução do volume e consequente desenvolvimento de recalques adicionais ao longo do tempo. A importância desse mecanismo é evidenciada pelo fato de que a maioria dos estudos analisados incorporou algum tipo de representação da biodegradação, seja por meio de parâmetros de decaimento, deformações biodegradativas, biocompressão ou modelos de degradação anaeróbia. Dessa forma, a biodegradação passou a ser reconhecida como um dos principais fatores responsáveis pelos recalques de longo prazo observados em aterros sanitários (Babu *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2010; Gomes; Caetano, 2010; Babu; Lakshmikanthan, 2015; Bente *et al.* 2017; Feng *et al.*, 2018; Tahmoorian; Khabbaz, 2019).

A geração de biogás foi outro mecanismo frequentemente considerado, embora sua representação varie significativamente entre os diferentes modelos. Em algumas formulações, a produção de gases é incorporada de forma indireta por meio dos parâmetros de biodegradação, assumindo que os efeitos da perda de massa orgânica já representam adequadamente sua influência sobre os recalques. Em outros estudos, a geração de biogás é modelada explicitamente, incluindo processos de produção de metano, pressão gasosa, fluxo de gás e dissipação de pressões internas. Observou-se que a representação explícita da geração de gás se torna mais frequente em modelos numéricos e acoplados, nos quais a interação entre as fases sólida, líquida e gasosa passa a desempenhar papel fundamental na previsão do comportamento dos resíduos (Chen *et al.*, 2020; Hunte *et al.*, 2012; Qiu; Li; Sun, 2013; Kumar; Reddy, 2017; Reddy *et al.*, 2018).

Os processos hidráulicos associados ao teor de umidade, fluxo de lixiviado, saturação e distribuição de água nos resíduos também apresentaram importância crescente entre os estudos analisados. Enquanto os modelos mais simples utilizam a umidade apenas como parâmetro inicial ou condição de contorno, as formulações mais avançadas passam a tratá-la como uma variável dinâmica capaz de influenciar diretamente a biodegradação, a geração de biogás e a evolução dos recalques. Em diversos estudos, a distribuição espacial da umidade, o fluxo de lixiviado e a interação entre fases líquida e sólida foram incorporados explicitamente às análises (Feng *et al.*, 2018; Reddy; Kumar; Giri, 2016, 2018; Reddy *et al.*, 2018)

Por fim, a temperatura foi identificada como o mecanismo menos frequente entre os estudos avaliados, porém sua participação cresce consideravelmente nas abordagens mais recentes. Inicialmente utilizada apenas como condição experimental ou parâmetro auxiliar, a temperatura passou a ser incorporada diretamente em modelos termo-hidro-bio-mecânicos, nos quais influencia a atividade microbiológica, as taxas de biodegradação, a geração de biogás e as propriedades dos resíduos. Estudos recentes passaram a considerar processos de transferência de calor, geração térmica decorrente da biodegradação e dependência térmica dos parâmetros do modelo, refletindo uma tendência de desenvolvimento de formulações multifísicas cada vez mais abrangentes (Safari; Noorzad; Mamaghanian, 2022; Hubert; Liu; Collin, 2016; Bente *et al.*, 2017; Berquist; Van Geel, 2020; Kumar *et al.*, 2021).

O Quadro 7 sintetiza os principais mecanismos identificados nos estudos analisados, apresentando seus respectivos objetivos na modelagem e a frequência qualitativa de ocorrência na literatura. Essa classificação foi estabelecida a partir da análise dos 51 estudos selecionados,

considerando apenas os trabalhos que abordam explicitamente cada mecanismo. Dessa forma, mecanismos presentes em pelo menos 15 estudos foram classificados como muito frequentes, aqueles identificados entre 8 e 14 estudos como frequentes, e os observados em menos de 8 estudos como pouco frequentes, correspondendo, portanto, a uma estimativa conservadora da recorrência desses processos nas diferentes abordagens de modelagem.

Quadro 7 – Principais mecanismos considerados pelos modelos de previsão de recalques avaliados

Mecanismo	Objetivo na modelagem	Frequência observada
Compressão mecânica	Representar deformações imediatas e primárias	Muito frequente
<i>Creep</i> mecânico	Representar deformações dependentes do tempo	Muito frequente
Biodegradação	Representar perda de massa orgânica e biocompressão	Muito frequente
Geração de biogás	Representar efeitos da produção e dissipação gasosa	Frequente
Umidade e lixiviado	Representar processos hidráulicos e biodegradativos	Frequente
Temperatura	Representar efeitos térmicos na biodegradação	Pouco frequente

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

5.2.2 PRINCIPAIS PARÂMETROS EMPREGADOS

A análise dos estudos selecionados demonstra que os parâmetros utilizados nos modelos de previsão de recalques podem ser agrupados em cinco categorias principais: parâmetros mecânicos, biodegradativos, hidráulicos, térmicos e gasosos. A importância relativa de cada grupo varia conforme o tipo de modelo adotado e os mecanismos representados em cada formulação.

Os parâmetros mecânicos constituem o grupo mais recorrente entre os modelos analisados, estando presentes em praticamente todas as abordagens. Entre os principais parâmetros empregados destacam-se índice de vazios, densidade, peso específico, tensão vertical, coeficientes de compressibilidade, coeficientes de fluência, razão de sobreconsolidação ou sobreadensamento (OCR), coesão e ângulo de atrito. Esses parâmetros são utilizados para

representar os mecanismos de compressão primária, deformação elastoplástica e fluência mecânica dos resíduos, sendo fundamentais tanto em modelos empíricos quanto em formulações constitutivas, numéricas e acopladas (Babu *et al.*, 2010; Chouksey; Babu; Reddy, 2012; Bareither; Kwak, 2015; Gao; Kavazanjian Jr., 2022).

Os parâmetros biodegradativos também apresentaram elevada frequência de utilização, refletindo a importância da decomposição da matéria orgânica na geração de recalques de longo prazo. Entre os parâmetros mais utilizados encontram-se deformação biodegradativa total, constantes de decomposição, taxas de biodegradação, frações biodegradáveis dos resíduos, potencial bioquímico de metano, teor de matéria orgânica e biomassa microbiana. Esses parâmetros permitem representar a perda progressiva de massa sólida e a consequente redução volumétrica dos resíduos ao longo do tempo (Gourc; Staub; Conte, 2010; Babu; Lakshmikanthan, 2015; Kumar; Reddy, 2017; Reddy; Kumar; Giri, 2018).

Nos modelos que incorporam processos hidráulicos, destacam-se parâmetros relacionados ao teor de umidade, saturação, porosidade, permeabilidade, condutividade hidráulica, curva de retenção hídrica, poropressão e propriedades hidráulicas não saturadas. Esses parâmetros são utilizados para representar o fluxo de lixiviado, a distribuição de umidade nos resíduos e as interações entre as fases líquida e sólida, influenciando diretamente os processos de biodegradação e os recalques associados (Hubert; Liu; Collin, 2016; Tahmoorian; Khabbaz, 2019; Safari; Noorzad; Mamaghanian, 2022).

Os parâmetros térmicos constituem o grupo menos frequente entre os estudos analisados, porém sua utilização aumenta significativamente nos modelos mais recentes. Entre os principais parâmetros empregados destacam-se temperatura, condutividade térmica, calor específico, capacidade térmica, coeficiente de expansão térmica e geração de calor associada à biodegradação. Esses parâmetros são utilizados principalmente em modelos termo-hidro-bio-mecânicos, nos quais a temperatura exerce influência direta sobre a atividade microbiológica e sobre as taxas de degradação da matéria orgânica (Berquist; Van Geel, 2020; Kumar *et al.*, 2021; Alghazali; Van Geel; Kenny, 2024).

De forma geral, observa-se que a quantidade e a diversidade de parâmetros aumentam significativamente à medida que os modelos passam a representar um número maior de mecanismos físicos, hidráulicos, térmicos e biodegradativos. No Quadro 8 são expostos os

principais parâmetros observados nas metodologias de previsão de recalques de acordo com o grupo.

Quadro 8 – Principais grupos de parâmetros utilizados

Grupo de parâmetros	Exemplos identificados
Mecânicos	índice de vazios, densidade, peso específico, OCR, compressibilidade, coesão, atrito
Biodegradativos	deformação biodegradativa total, constante de degradação, biomassa, matéria orgânica, potencial bioquímico de metano
Hidráulicos	teor de umidade, saturação, permeabilidade, condutividade hidráulica, poropressão
Gasosos	pressão de gás, produção de metano, fluxo gasoso
Térmicos	temperatura, condutividade térmica, calor específico

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

5.2.3 DADOS NECESSÁRIOS E COMPLEXIDADE DAS ABORDAGENS

Além da diversidade de parâmetros empregados, os estudos analisados evidenciam diferenças significativas quanto aos dados necessários para aplicação dos modelos e ao nível de complexidade associado a cada abordagem. De forma geral, verificou-se que a complexidade dos modelos está diretamente relacionada ao número de mecanismos considerados e à quantidade de informações necessárias para sua calibração e validação.

Os modelos empíricos apresentam os menores requisitos de entrada, utilizando predominantemente dados de monitoramento de recalques, tempo de operação, altura dos resíduos e parâmetros obtidos por regressão estatística. Em muitos casos, esses modelos são calibrados diretamente a partir de séries históricas de recalques observados em campo ou em lisímetros experimentais, o que reduz a necessidade de caracterização detalhada dos resíduos (Gomes; Caetano, 2010; Wong *et al.*, 2013; Araújo Neto *et al.*, 2017; Jo; Jang, 2022).

Diferente dos modelos empíricos, os modelos constitutivos exigem um conjunto mais amplo de informações geotécnicas, incluindo parâmetros de compressibilidade, fluência, resistência e estado inicial dos resíduos. A obtenção desses parâmetros normalmente depende da realização de ensaios laboratoriais específicos ou de processos de calibração baseados em dados

experimentais, aumentando o esforço necessário para aplicação das formulações (Babu *et al.*, 2010; Chouksey; Babu; Reddy, 2012; Siddiqui; Powrie; Richards, 2013).

Nos modelos numéricos observa-se uma ampliação significativa da quantidade de dados necessários. Além das propriedades geotécnicas dos resíduos, esses modelos frequentemente demandam informações relacionadas à geometria do aterro, condições de contorno, fluxo de lixiviado, distribuição de umidade, propriedades hidráulicas e, em alguns casos, parâmetros térmicos. Consequentemente, sua aplicação requer maior disponibilidade de dados de campo e maior capacidade computacional (Hunte *et al.*, 2012; Tahmoorian; Khabbaz, 2019; Safari; Noorzad; Mamaghani, 2022).

Dentre os grupos de modelos avaliados, os modelos acoplados representam o maior nível de complexidade identificado nos artigos analisados. Essas formulações exigem simultaneamente parâmetros mecânicos, hidráulicos, biodegradativos e térmicos, além de informações relacionadas à geração de biogás, composição dos resíduos, recirculação de lixiviado, temperatura interna e evolução temporal das propriedades do material. Como consequência, sua aplicação normalmente depende da integração de monitoramentos de campo, ensaios laboratoriais, dados operacionais e procedimentos de calibração numérica (Hubert; Liu; Collin, 2016; Kumar *et al.*, 2021; Kumar; Reddy; Foster, 2021; Alghazali; Van Geel; Kenny, 2024).

Outro aspecto relevante observado nos estudos analisados refere-se às estratégias de obtenção dos dados utilizados na modelagem. Foram identificadas abordagens baseadas em monitoramento de campo, ensaios laboratoriais, lisímetros experimentais, dados da literatura, técnicas de sensoriamento remoto, como InSAR, e processos de calibração numérica. A combinação dessas diferentes fontes de informação tornou-se cada vez mais frequente nos modelos mais recentes, refletindo a necessidade de representar adequadamente a elevada heterogeneidade dos resíduos sólidos urbanos e os múltiplos processos envolvidos nos recalques dos aterros sanitários.

Dessa forma, verifica-se que a escolha do modelo não depende apenas da capacidade de representação dos mecanismos físicos envolvidos, mas também da disponibilidade de dados necessários para sua aplicação. Enquanto modelos mais simples apresentam maior facilidade de utilização e menor demanda por informações, modelos mais complexos tendem a fornecer representações mais abrangentes do comportamento dos resíduos, embora exijam esforços significativamente maiores de caracterização, monitoramento e calibração.

O Quadro 9 sintetiza os principais requisitos de aplicação observados para cada grupo de modelos, destacando os dados de entrada mais frequentemente utilizados, as formas predominantes de obtenção dessas informações e o nível relativo de complexidade associado a cada abordagem.

Quadro 9 – Requisitos de aplicação e nível de complexidade das diferentes abordagens de modelagem para previsão de recalques em aterros sanitários.

Tipo de modelo	Principais dados necessários	Forma predominante de obtenção	Nível de complexidade
Empírico	Recalques monitorados, tempo de operação, altura dos resíduos e parâmetros de regressão	Monitoramento de campo, lisímetros e calibração estatística	Baixo
Constitutivo	Parâmetros mecânicos de compressibilidade, fluência, resistência e estado inicial dos resíduos	Ensaio laboratoriais e calibração experimental	Médio
Numérico	Parâmetros geotécnicos, geometria do aterro, condições de contorno, propriedades hidráulicas, umidade e, em alguns casos, temperatura	Ensaio laboratoriais, monitoramento de campo e modelagem numérica	Alto
Acoplado	Parâmetros geotécnicos, hidráulicos, biodegradativos e térmicos, além de informações sobre geração de biogás, recirculação de lixiviado e evolução temporal dos resíduos	Integração de monitoramentos de campo, ensaios laboratoriais, dados operacionais e calibração numérica	Muito alto

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

5.3 DESEMPENHO DAS DIFERENTES ABORDAGENS DE MODELAGEM

A análise dos estudos selecionados demonstra que o desempenho dos modelos de previsão de recalques em aterros sanitários está diretamente relacionado à capacidade de representar os mecanismos predominantes de deformação dos resíduos e à disponibilidade de dados para

calibração e validação das formulações. De forma geral, observou-se que nenhuma abordagem pode ser considerada universalmente superior, uma vez que a acurácia das previsões depende das condições específicas do aterro, da qualidade dos dados disponíveis e dos objetivos da modelagem. Entretanto, algumas tendências puderam ser identificadas a partir dos resultados reportados pelos autores.

Os modelos empíricos apresentaram desempenho satisfatório quando calibrados com dados reais de monitoramento. Em diversos estudos, a utilização de séries históricas de recalques permitiu obter boa concordância entre valores observados e previstos, especialmente em análises de curto e médio prazo. Gourc, Staub e Conte (2010) reportaram erros relativos finais entre 2,0% e 21,4%, enquanto Gomes e Caetano (2010) verificaram erros médios de apenas 2% em um dos aterros analisados após a calibração de modelos de regressão específicos para os dados monitorados. De forma semelhante, Hadinata *et al.* (2018) observaram diferenças inferiores a 5% entre recalques medidos e estimados após a modificação do modelo de Sowers, enquanto Jo *et al.* (2023) reportaram razões entre os recalques modelados e medidos variando entre 98,8% e 100,6%, indicando elevada concordância com os dados de campo. Esses resultados evidenciam que modelos empíricos podem apresentar elevada precisão quando desenvolvidos ou calibrados para condições locais específicas.

Apesar dos bons resultados observados, os modelos empíricos apresentaram limitações importantes relacionadas à extrapolação dos resultados. Diversos autores destacaram que parâmetros calibrados para determinado aterro dificilmente podem ser transferidos para outras condições de operação sem perda significativa de precisão, tornando necessária a calibração específica para cada empreendimento (Gomes; Caetano, 2010; Van Geel; Murray, 2015; Jo; Jang, 2022). Além disso, por serem fundamentados predominantemente em ajustes estatísticos, esses modelos apresentam capacidade limitada para representar explicitamente os mecanismos físicos responsáveis pelos recalques, sendo mais indicados para situações em que exista disponibilidade de séries históricas consistentes de monitoramento. A heterogeneidade dos resíduos sólidos urbanos, a escassez de registros de longo prazo e a necessidade de calibração contínua foram identificadas como fatores que restringem sua aplicação generalizada e aumentam as incertezas associadas às previsões (Klink; Van Elk; Silva, 2021; Jo; Jang, 2022).

Os modelos constitutivos apresentaram desempenho consistente na representação simultânea dos mecanismos de compressão mecânica, fluência e biodegradação. Os estudos analisados indicam que essas formulações foram capazes de reproduzir satisfatoriamente a evolução dos

recalques observados, apresentando boa concordância com dados experimentais e de campo após a calibração dos parâmetros (Babu *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2010; Chouksey; Babu; Reddy, 2012; Siddiqui; Powrie; Richards, 2013; Gao *et al.*, 2017a). A principal vantagem dessas formulações consiste na utilização de parâmetros com significado físico, permitindo avaliar separadamente a contribuição dos diferentes mecanismos responsáveis pelos recalques. Além disso, diversos autores destacaram sua capacidade de representar adequadamente a evolução temporal das deformações e fornecer previsões fisicamente consistentes para diferentes condições operacionais (Babu *et al.*, 2010; Babu; Reddy; Chouksey, 2011; Siddiqui; Powrie; Richards, 2013; Gao; Kavazanjian Jr., 2022).

Entretanto, a aplicação de modelos constitutivos depende fortemente da obtenção de parâmetros geotécnicos e biodegradativos confiáveis. A variabilidade dos resíduos sólidos urbanos, associada à dificuldade de caracterização laboratorial e à necessidade de calibração experimental, foi apontada como uma das principais fontes de incerteza. Em diversos estudos, os autores ressaltaram que a precisão das previsões depende diretamente da qualidade dos parâmetros adotados, tornando a etapa de caracterização dos resíduos um fator crítico para o sucesso da modelagem (Babu *et al.*, 2010; Babu; Reddy; Chouksey, 2011; Gao *et al.*, 2017a).

Os modelos numéricos apresentaram elevada capacidade de representar condições reais de operação, permitindo incorporar aspectos como geometria do aterro, histórico de disposição, fluxo de lixiviado, geração de biogás, temperatura e heterogeneidade dos resíduos. Diversos estudos reportaram boa concordância entre simulações e medições de campo. Hunte *et al.* (2012) observaram diferença de apenas 3,9% entre recalques previstos e medidos quando os efeitos da umidade e da geração de gás foram incorporados à modelagem. Chen, Chen e Liu (2012) reportaram diferenças inferiores a 0,6% entre soluções analíticas e numéricas, enquanto Gao *et al.* (2017b) obtiveram erros inferiores a 5% na estimativa da capacidade volumétrica e apenas 2,02% para o volume geométrico acumulado. Além disso, modelos mais recentes incorporando processos hidráulicos, térmicos e biodegradativos demonstraram boa capacidade de reproduzir tendências observadas em campo, incluindo variações de temperatura, produção de biogás, distribuição de umidade e recalques de longo prazo (Alghazali; Van Geel; Kenny, 2025; Safari; Noorzad; Mamaghanian, 2022; Berquist; Van Geel, 2020).

Apesar dos resultados promissores, os estudos também evidenciam que a principal limitação dos modelos numéricos está associada à elevada quantidade de parâmetros necessários para sua aplicação (Ke *et al.*, 2011; Hunte *et al.*, 2012; Reddy; Kumar; Giri, 2018). A obtenção de

propriedades hidráulicas, térmicas, mecânicas e biodegradativas confiáveis representa um desafio recorrente, especialmente devido à elevada heterogeneidade dos resíduos sólidos urbanos (Safari; Noorzad; Mamaghanian, 2022; Berquist; Van Geel, 2020). Além disso, houve autores que destacaram a necessidade de calibração contínua e o elevado custo computacional associado às análises mais complexas (Kumar; Reddy, 2017; Alghazali; Van Geel; Kenny, 2025).

De forma geral, os modelos acoplados representam o estágio mais avançado das abordagens identificadas na literatura. Esses modelos apresentaram excelente capacidade de representar simultaneamente os processos mecânicos, hidráulicos, térmicos e biodegradativos envolvidos nos recalques dos aterros sanitários. Estudos desenvolvidos por Liu *et al.* (2011), Bente *et al.* (2017), Chen *et al.* (2020), Kumar, Reddy e Foster (2021) e Alghazali, Van Geel e Kenny (2024) demonstraram boa concordância entre simulações e observações experimentais ou de campo, reproduzindo adequadamente não apenas os recalques, mas também fenômenos associados à geração de biogás, evolução térmica, degradação da matéria orgânica e alterações das propriedades dos resíduos ao longo do tempo.

Entretanto, a maior capacidade de representação física observada nos modelos acoplados está associada a um aumento significativo da complexidade de aplicação. Esses modelos demandam um grande número de parâmetros hidráulicos, térmicos, mecânicos e bioquímicos, muitos dos quais apresentam elevada variabilidade e difícil obtenção em campo (Chen *et al.*, 2020; Datta; Ering; Babu, 2015). Além disso, a necessidade de monitoramento multiparâmetro, calibração detalhada e maior esforço computacional constitui um fator limitante para sua aplicação rotineira em projetos de engenharia. Assim, embora apresentem elevado potencial para análises avançadas e estudos de pesquisa, sua utilização prática ainda depende da disponibilidade de informações detalhadas sobre o comportamento dos resíduos e sobre as condições operacionais do aterro (Simões; Catapreta, 2012; Bente *et al.*, 2017; Alghazali; Van Geel; Kenny, 2024).

A partir da análise conjunta dos estudos, verifica-se que a calibração dos parâmetros e a disponibilidade de dados de campo constituem os fatores que mais influenciam a acurácia das previsões. Independentemente do tipo de modelo empregado, os melhores resultados foram observados nos estudos que utilizaram monitoramentos de longo prazo para ajuste e validação das formulações. Por outro lado, a ausência de dados confiáveis, a heterogeneidade dos resíduos, as simplificações adotadas para representar os processos biodegradativos e a dificuldade de obtenção de parâmetros representativos foram identificadas como as principais

fontes de incerteza. Dessa forma, os resultados indicam que a qualidade dos dados utilizados na modelagem exerce influência tão importante quanto a própria complexidade da formulação adotada.

De modo geral, os modelos empíricos tendem a apresentar melhor relação entre simplicidade e desempenho quando existem dados locais suficientes para calibração, enquanto modelos constitutivos oferecem maior significado físico aos parâmetros utilizados. Já os modelos numéricos permitem representar cenários operacionais complexos e incorporar diferentes mecanismos de recalque, ao passo que os modelos acoplados fornecem a descrição mais abrangente dos processos envolvidos. Entretanto, o aumento da complexidade não garante necessariamente maior precisão, uma vez que o desempenho final permanece fortemente condicionado à qualidade dos parâmetros adotados e à disponibilidade de dados para validação das previsões.

O Quadro 10 apresenta uma síntese comparativa das principais características observadas para cada tipo de abordagem de modelagem, destacando suas vantagens, limitações, formas de validação e desempenho reportado nos artigos revisados. Complementarmente, o Quadro 11 reúne os principais fatores identificados como influentes na acurácia das previsões, evidenciando os aspectos mais frequentemente associados às incertezas e ao desempenho dos modelos analisados.

Quadro 10 – Resumo de desempenho dos diferentes modelos avaliados

Tipo de modelo	Principais vantagens	Principais limitações	Validação típica	Desempenho observado
Empírico	Simplicidade, poucos parâmetros, fácil aplicação	Dependência de calibração local e baixa capacidade de extrapolação	Monitoramento de campo e regressões estatísticas	Bom desempenho quando calibrado com dados locais
Constitutivo	Parâmetros com significado físico, separação dos mecanismos de recalque	Necessidade de caracterização geotécnica detalhada e calibração experimental	Ensaios laboratoriais e comparações com modelos validados	Boa representação dos mecanismos de compressão, <i>creep</i> e biodegradação

Tipo de modelo	Principais vantagens	Principais limitações	Validação típica	Desempenho observado
Numérico	Representação da geometria, condições de contorno e múltiplos processos	Grande quantidade de parâmetros e elevado esforço de calibração	Dados de campo, ensaios laboratoriais e validação numérica	Boa concordância com medições reais quando adequadamente calibrado
Acoplado	Representação integrada dos processos mecânicos, hidráulicos, biológicos e térmicos	Elevada complexidade, necessidade de muitos parâmetros e monitoramento detalhado	Campo, laboratório e monitoramento multiparâmetro	Melhor representação física do comportamento dos resíduos

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

Quadro 11 – Principais fatores que influenciam a acurácia das previsões

Fator	Influência observada
Calibração com dados locais	Maior impacto positivo na acurácia
Monitoramento de longo prazo	Melhora significativa das previsões
Representação da biodegradação	Fundamental para recalques de longo prazo
Consideração da umidade	Importante em aterros com recirculação de lixiviado
Consideração da geração de gás	Melhora a representação dos processos biodegradativos
Consideração da temperatura	Relevante em modelos multifísicos recentes
Qualidade dos parâmetros de entrada	Principal fonte de incerteza
Heterogeneidade dos resíduos	Principal dificuldade de modelagem relatada

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

5.4 LACUNAS, DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

A análise crítica dos estudos selecionados demonstra que, apesar dos avanços observados nas últimas décadas, a previsão de recalques em aterros sanitários ainda apresenta desafios científicos e tecnológicos importantes. As limitações relatadas pelos autores concentram-se

principalmente na elevada heterogeneidade dos resíduos sólidos urbanos, na dificuldade de obtenção de parâmetros representativos, na escassez de dados experimentais de longo prazo e na necessidade de validações adicionais em condições reais de operação. Essas limitações foram identificadas em diferentes tipos de modelos, independentemente do grau de complexidade da abordagem empregada, evidenciando que o avanço da área depende tanto do aprimoramento das formulações existentes, do desenvolvimento de novas formulações quanto da ampliação das bases de dados utilizadas para calibração e validação dos modelos (Babu *et al.*, 2010; Chouksey; Babu; Reddy, 2012; Tahmoorian; Khabbaz, 2019; Alghazali; Van Geel; Kenny, 2024).

Entre as principais dificuldades apontadas pelos autores, destaca-se a elevada variabilidade espacial e temporal dos resíduos sólidos urbanos. A composição gravimétrica, o teor de matéria orgânica, a densidade, o teor de umidade, as propriedades hidráulicas e os parâmetros biodegradativos variam significativamente entre diferentes aterros e até mesmo entre diferentes regiões de um mesmo maciço, dificultando a obtenção de parâmetros representativos para utilização em modelos matemáticos. Diversos estudos ressaltam que essa heterogeneidade constitui uma das principais fontes de incerteza das previsões, sendo frequentemente responsável pela necessidade de calibração específica para cada aterro sanitário (Datta; Ering; Babu, 2015; Reddy; Kumar; Giri, 2016; Feng *et al.*, 2018; Kumar *et al.*, 2021; Alghazali; Van Geel; Kenny, 2025).

Outro aspecto recorrente refere-se à escassez de monitoramentos de longo prazo. Grande parte dos estudos destacou que a disponibilidade limitada de dados de campo dificulta tanto a calibração quanto a validação das formulações propostas. Em diversos casos, os períodos de monitoramento abrangem apenas parte da vida útil do aterro, impossibilitando a avaliação completa das fases de recalque associadas à biodegradação e ao *creep* mecânico. Além disso, problemas operacionais, perda de instrumentos de monitoramento, corrosão de placas de recalque, interrupções nas campanhas de aquisição de dados e limitações de custo foram relatados como fatores que reduzem a confiabilidade das bases experimentais utilizadas na modelagem (Gomes; Caetano, 2010; Hettiarachchi, 2012; Jo; Jang, 2022; Jo *et al.*, 2023).

A obtenção e a calibração dos parâmetros também representam um dos principais desafios identificados na literatura. Muitos parâmetros empregados nos modelos, especialmente aqueles relacionados à biodegradação, propriedades hidráulicas, geração de biogás e comportamento térmico dos resíduos, não podem ser determinados diretamente em campo, sendo

frequentemente assumidos com base na literatura ou ajustados durante o processo de calibração. Como consequência, diferentes conjuntos de parâmetros podem produzir resultados semelhantes para um mesmo aterro, aumentando as incertezas associadas às previsões e reduzindo a capacidade de generalização dos modelos (Hubert; Liu; Collin, 2016; Chen *et al.*, 2020; Kumar *et al.*, 2021; Safari; Noorzad; Mamaghanian, 2022; Gao; Kavazanjian Jr., 2022).

Os estudos também evidenciam que, embora os modelos mais recentes tenham avançado significativamente na representação integrada dos processos mecânicos, hidráulicos, biológicos e térmicos, ainda existem simplificações importantes. Diversos autores apontam limitações relacionadas à representação da heterogeneidade dos resíduos, à consideração da temperatura constante, à utilização de propriedades hidráulicas invariáveis, à modelagem simplificada da biodegradação e à ausência de acoplamento completo entre geração de biogás, fluxo de lixiviado e deformações mecânicas. Em alguns casos, também foram identificadas dificuldades na representação de recalques diferenciais, deformações horizontais, processos tridimensionais e efeitos associados à sequência construtiva dos aterros (Liu *et al.*, 2011; Qiu; Li; Sun, 2013; Kumar; Reddy, 2017; Berquist; Van Geel, 2020; Alghazali; Van Geel; Kenny, 2025).

Outro aspecto observado refere-se à transferência dos modelos para diferentes condições de operação. Diversos trabalhos demonstraram bom desempenho quando calibrados para aterros específicos, porém ressaltaram dificuldades para aplicação em locais com características distintas de clima, composição dos resíduos, altura do maciço ou estratégia operacional. Estudos desenvolvidos em regiões de clima frio, por exemplo, evidenciaram a influência significativa da temperatura sobre as taxas de biodegradação e evolução dos recalques, enquanto pesquisas conduzidas em regiões tropicais destacaram o papel da elevada umidade e da rápida decomposição da matéria orgânica. Esses resultados indicam que a aplicação indiscriminada de parâmetros obtidos em outras regiões pode comprometer significativamente a confiabilidade das previsões (Van Geel; Murray, 2015; Berquist; Van Geel, 2020; Alghazali; Van Geel; Kenny, 2024; Klink; Van Elk; Silva, 2021).

Embora os avanços recentes envolvendo modelos numéricos, acoplados e técnicas de monitoramento remoto tenham ampliado significativamente a capacidade de representação dos processos responsáveis pelos recalques, diversos autores ressaltam que o aumento da complexidade das formulações não garante, por si só, maior precisão das previsões. Trabalhos comparativos demonstraram que modelos empíricos adequadamente calibrados podem apresentar desempenho semelhante ao de formulações mais sofisticadas quando aplicados em

condições para as quais foram desenvolvidos, enquanto modelos altamente complexos permanecem fortemente dependentes da disponibilidade de parâmetros confiáveis e de monitoramentos detalhados (Bareither; Kwak, 2015; Jo; Jang, 2022; Alghazali; Van Geel; Kenny, 2025). Dessa forma, observa-se que o principal desafio atual não consiste apenas no desenvolvimento de modelos mais elaborados, mas na obtenção de informações experimentais que permitam representar adequadamente a variabilidade dos resíduos sólidos urbanos.

A análise conjunta das limitações, dificuldades e perspectivas apresentadas pelos diferentes autores permitiu identificar tendências recorrentes independentemente do tipo de modelo empregado. Dessa forma, no Quadro 12 são sintetizados os principais desafios observados na literatura, bem como as oportunidades de pesquisa identificadas a partir dos estudos analisados.

Quadro 12 – Síntese das principais lacunas, desafios e perspectivas futuras identificadas na literatura sobre modelos de previsão de recalques em aterros sanitários.

Aspecto	Evidências observadas na literatura	Perspectivas futuras
Heterogeneidade dos resíduos sólidos urbanos	A elevada variabilidade espacial e temporal das propriedades dos resíduos foi apontada como a principal fonte de incerteza na determinação dos parâmetros e na calibração dos modelos.	Desenvolvimento de metodologias capazes de representar de forma mais realista a variabilidade dos resíduos e criação de bancos de dados específicos para diferentes condições de operação.
Disponibilidade de dados de campo	A escassez de monitoramentos de longo prazo limita a calibração e a validação das formulações, reduzindo a confiabilidade das previsões.	Ampliação de programas de instrumentação e monitoramento contínuo em aterros sanitários, contemplando toda a vida útil dos empreendimentos.

Aspecto	Evidências observadas na literatura	Perspectivas futuras
Calibração dos parâmetros	Muitos parâmetros hidráulicos, biodegradativos e térmicos são obtidos por calibração ou assumidos da literatura devido à dificuldade de determinação direta.	Desenvolvimento de procedimentos experimentais padronizados para determinação dos parâmetros de entrada dos modelos.
Representação dos processos físicos	Diversos estudos ainda simplificam fenômenos como geração de biogás, transferência de calor, fluxo de lixiviado, comportamento tridimensional e interação entre fases.	Desenvolvimento de modelos multifísicos e multifásicos mais completos, capazes de representar simultaneamente os principais mecanismos envolvidos nos recalques.
Generalização dos modelos	Modelos calibrados para determinado aterro apresentam limitações quando aplicados em condições geotécnicas, climáticas ou operacionais distintas.	Avaliação dos modelos em diferentes tipos de aterros, condições climáticas e composições de resíduos, ampliando sua aplicabilidade.
Aplicação prática	Modelos mais complexos apresentam elevado número de parâmetros, maior custo computacional e necessidade de informações nem sempre disponíveis em projetos reais.	Desenvolvimento de modelos com equilíbrio entre fundamentação física, facilidade de aplicação e disponibilidade de dados.
Contexto brasileiro	Poucos estudos brasileiros encontrados no contexto da presente pesquisa.	Ampliação de estudos experimentais e monitoramentos em aterros brasileiros, permitindo calibração de modelos compatíveis com a realidade nacional.

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

6 CONCLUSÕES

De forma geral, a análise dos estudos selecionados permitiu consolidar um panorama abrangente sobre o desenvolvimento dos modelos de previsão de recalques em aterros sanitários, evidenciando uma evolução progressiva das abordagens, desde formulações simplificadas baseadas em mecanismos de compressão mecânica e fluência até modelos multifásicos e multifísicos capazes de representar, de forma integrada, processos mecânicos, hidráulicos, biológicos e térmicos. Nesse sentido, a presente revisão evidencia que a evolução dos modelos de previsão de recalques ocorreu de maneira consistente ao longo das últimas décadas, incorporando progressivamente mecanismos cada vez mais representativos do comportamento dos resíduos sólidos urbanos. A revisão demonstrou, ainda, que o desempenho das diferentes abordagens depende não apenas da complexidade da formulação adotada, mas principalmente da disponibilidade e da qualidade das informações utilizadas na calibração e validação dos modelos.

Os resultados obtidos indicam que a escolha do modelo mais adequado deve considerar, além das características da formulação matemática, fatores como o clima e a região de implantação do aterro, a composição e a idade dos resíduos, a disponibilidade de dados de monitoramento, a existência de ensaios laboratoriais representativos e o nível de detalhamento necessário para a análise. Nesse contexto, verificou-se que modelos mais complexos nem sempre produzem previsões mais precisas, uma vez que sua aplicação depende de um número elevado de parâmetros, cuja obtenção pode ser limitada ou envolver elevado grau de incerteza. Em diversas situações, modelos mais simples, desde que adequadamente calibrados com dados locais, apresentaram desempenho semelhante ou superior ao de abordagens mais sofisticadas.

Nesse sentido, os resultados corroboram as observações de Klink, van Elk e Silva (2021), que destacam que a previsão de recalques de longo prazo em aterros sanitários não deve se basear em uma única formulação matemática, sendo recomendável a utilização de mais de um modelo para possibilitar análises comparativas e aumentar a confiabilidade das previsões. Dessa forma, a seleção da abordagem de modelagem deve ser entendida como um processo de compatibilização entre a finalidade da análise, a disponibilidade de informações e o grau de incerteza aceitável para o empreendimento, e não apenas como a escolha do modelo teoricamente mais completo.

A análise crítica também evidenciou que a elevada heterogeneidade dos resíduos sólidos urbanos, a escassez de dados de campo e de monitoramentos de longo prazo, a dificuldade de obtenção de parâmetros representativos e as limitações associadas à calibração continuam sendo os principais fatores que restringem a aplicação e a generalização dos modelos existentes. Assim, os avanços futuros dependerão não apenas do desenvolvimento de modelos mais sofisticados e de formulações fisicamente mais consistentes, mas principalmente da melhoria da caracterização dos resíduos, da expansão dos programas de monitoramento e da integração entre modelagem e dados experimentais, permitindo previsões mais robustas e aplicáveis às diferentes realidades dos aterros sanitários.

Como limitações do presente estudo, destaca-se que a revisão bibliográfica foi realizada exclusivamente na base de dados Scopus e teve como recorte temporal principal os trabalhos publicados a partir de 2010, de modo que estudos relevantes indexados apenas em outras bases ou publicados fora do período priorizado podem não ter sido incorporados à amostra principal. Além disso, para fins de organização e análise comparativa, os artigos foram classificados segundo a abordagem predominante de modelagem, considerando que determinadas pesquisas apresentam características simultaneamente associadas a mais de uma categoria, como abordagens numéricas, constitutivas e acopladas. Essas delimitações não comprometem os resultados obtidos, mas devem ser consideradas na interpretação das conclusões e indicam possibilidades de ampliação em estudos futuros, por meio da inclusão de outras bases de dados, da expansão do recorte temporal e da adoção de estratégias complementares de classificação dos modelos.

Espera-se, portanto, que os resultados desta pesquisa contribuam para uma seleção mais criteriosa dos modelos de previsão de recalques, fornecendo subsídios para futuras investigações e para a aplicação dessas ferramentas no planejamento, operação e pós-fechamento de aterros sanitários.

REFERÊNCIAS

ADAMCOVÁ, Dana; BARTON, Stanislav; PODLASEK, Anna; OSINSKI, Piotr; VAVERKOVÁ, Magdalena Daria; PASTERNAK, Grzegorz; KODA, Eugeniusz. Analytical modelling of MSW landfill surface displacement based on GNSS monitoring. *Sensors*, Basel, v. 20, n. 21, p. 5998, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20215998>. Acesso em: 3 jan. 2026.

ALGHAZALI, Wameed; VAN GEEL, Paul J.; KENNY, Shawn. Enhancing an existing composite model to estimate MSW settlement during the filling and post-closure phases in both warm and cold regions. *Journal of Environmental Management*, v. 384, 2025. Disponível em: <https://www.scopus.com/pages/publications/105003902399?origin=resultslist>. Acesso em: 3 jan. 2026.

ALGHAZALI, Wameed; KENNY, Shawn; VAN GEEL, Paul J. A comparative study of selected models simulating the settlement of municipal solid waste (MSW) with a focus on landfills in northern climates. *Waste Management*, v. 190, p. 236–250, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.09.024>. Acesso em: 25 mar. 2026.

ALGHAZALI, W.; VAN GEEL, P. J.; KENNY, S. A comprehensive study of settlement during the filling and post-closure phases at a landfill in Québec, Canada: field data and TMB modelling. *Waste Management*, v. 179, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.02.019>. Acesso em: 4 mar. 2026.

ALVES, Gustavo Leone Marasco; MASINI, Jean Cláudio de Andrade; ALMEIDA, Júlia Righi de. Análise crítica dos modelos de previsão e monitoramento de recalques mais empregados em aterros sanitários brasileiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA (COBRAMSEG), 2024. *Anais [...]*. 2024. Disponível em: <https://2024.cobramseg.com.br/evento/cobramseg2024/trabalhosaprovados/naintegra/972>. Acesso em: 14 dez. 2025.

ARAÚJO NETO, C. L.; NÓBREGA, B. M. A.; SOUSA, R. B. A.; MELO, M. C.; PAIVA, W.; MONTEIRO, V. E. D. Statistical modeling of municipal solid waste settlement from a lysimeter. *Soils and Rocks*, 2017. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/7c3d/dce85279ac18f748d0a8edca60efa69f2ad7.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8419: apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13896: aterros de resíduos não perigosos: critérios para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15849: resíduos sólidos urbanos: aterros sanitários de pequeno porte**. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

AVINASH, Lagudu S.; MISHRA, Anumita. Experimental evaluation and comparative analysis of settlement models for predicting long-term behavior of MSW landfills. *Journal of*

Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 2025. Disponível em:

[https://ascelibrary.org/doi/epdf/10.1061/JHTRBP.HZENG-](https://ascelibrary.org/doi/epdf/10.1061/JHTRBP.HZENG-1520?src=getft&utm_source=scopus&getft_integrator=scopus)

1520?src=getft&utm_source=scopus&getft_integrator=scopus. Acesso em: 17 mar. 2026.

BABU, G. L. Sivakumar; LAKSHMIKANTHAN, P. Estimation of the components of municipal solid waste settlement. **Waste Management & Research**, v. 33, n. 1, p. 34–38, 2015. Disponível em:

<https://www.scopus.com/pages/publications/84925682388?origin=resultslist>. Acesso em: 31 mar. 2026.

BABU, G. L. Sivakumar; REDDY, Krishna R.; CHOUKSEY, Sandeep K. Parametric study of MSW landfill settlement model. **Waste Management**, v. 31, n. 6, p. 1222–1231, 2011. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X11000171?pes=vor&utm_source=scopus&getft_integrator=scopus. Acesso em: 11 fev. 2026.

BABU, G. L. Sivakumar; REDDY, Krishna R.; CHOUSKEY, Sandeep K.; KULKARNI, Hanumanth S. Prediction of long-term municipal solid waste landfill settlement using constitutive model. **Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management**, v. 14, n. 2, p. 139–150, 2010. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.1944-8376.0000024](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.1944-8376.0000024). Acesso em: 6 abr. 2026.

BAREITHER, Christopher A.; KWAK, Seungbok. Assessment of municipal solid waste settlement models based on field-scale data analysis. **Waste Management**, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.011>. Acesso em: 11 fev. 2026.

BENTE, S.; KRASE, V.; KOWALSKY, U.; DINKLER, D. Model for degradation-induced settlements as part of a coupled landfill model. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/nag.2687>. Acesso em: 28 mar. 2026.

BERQUIST, Courtney S.; VAN GEEL, Paul J. Simulating temperature-dependent biodegradation-induced settlement at a landfill with waste lifts placed under frozen conditions. **Waste Management**, v. 104, p. 74–81, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.002>. Acesso em: 2 abr. 2026.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 15 dez. 2025.

CHAKMA, Sumedha; MATHUR, Shashi. Estimation of primary and mechanical compression in MSW landfills. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management**, v. 16, n. 4, p. 298–303, 2012. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000117](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000117). Acesso em: 6 abr. 2026.

CHAKMA, Sumedha; MATHUR, Shashi. Postclosure long-term settlement for MSW landfills. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v. 17, n. 2, p. 81–88, 2013. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000164](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000164). Acesso em: 1 abr. 2026.

CHAMPAGNE, C. L.; ZEKOS, D.; LYNCH, J. P.; O'LAUGHLIN, S. Waste settlement measurements using unmanned aerial vehicles at a municipal solid waste landfill in Michigan. In: GEO-CONGRESS 2020, 2020. **Geotechnical Special Publication 319**. Reston: ASCE, 2020. p. 249–258. Disponível em: <https://www.scopus.com/pages/publications/85081976026?origin=resultslist>. Acesso em: 2 abr. 2026.

CHEN, Kuo-Sheng; CHEN, Rong-Her; LIU, Chia-Nan. Modeling municipal solid waste landfill settlement. **Environmental Earth Sciences**, v. 66, p. 2301–2309, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1453-6>. Acesso em: 19 mar. 2026.

CHEN, Y.; KE, H.; FREDLUND, D. G.; ZHAN, L.; XIE, Y. Secondary compression of municipal solid wastes and a compression model for predicting settlement of municipal solid waste landfills. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 136, n. 5, p. 706–717, 2010. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000273](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000273). Acesso em: 1 abr. 2026.

CHEN, Y. M.; XU, W. J.; LING, D. S.; ZHAN, L. T.; GAO, W. A degradation–consolidation model for the stabilization behavior of landfilled municipal solid waste. **Computers and Geotechnics**, v. 118, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103341>. Acesso em: 26 mar. 2026.

CHOUKSEY, S. K.; BABU, G. L. S.; REDDY, K. R. Settlement analysis of MSW based on constitutive modeling approach. In: GEOCONGRESS 2012, 2012. **Proceedings [...]**. Reston: ASCE, 2012. p. 4176–4183. Disponível em: <https://www.scopus.com/pages/publications/84888360579?origin=resultslist>. Acesso em: 6 abr. 2026.

DATTA, Sampurna; ERING, Pinom; BABU, G. L. Sivakumar. Reliability analysis of municipal solid waste landfill settlements. **Japanese Geotechnical Society Special Publication**, 2015. Disponível em: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jgssp/2/52/2_IND-07/_article. Acesso em: 11 fev. 2026.

DU, Yanan; FU, Haiqiang; LIU, Lin; FENG, Guangcai; WEN, Debao; PENG, Xing; DING, Huaxiang. Continued monitoring and modeling of Xingfeng solid waste landfill settlement, China, based on multiplatform SAR images. **Remote Sensing**, v. 13, n. 16, p. 3286, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13163286>. Acesso em: 3 jan. 2026.

FENG, Shi-Jin; BAI, Zhen-Bai; CHEN, Hong-Xin; CAO, Ben-Yi; LU, Shi-Feng; CHEN, Yun-Min. A dual-permeability hydro-biodegradation model for leachate recirculation and settlement in bioreactor landfills. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 14614–14625, 2018. Disponível em: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11356-018-1690-2.pdf?utm_source=scopus&getf_integrator=scopus. Acesso em: 28 mar. 2026.

GAO, W.; BIAN, X.; XU, W.; CHEN, Y. An equivalent-time-lines model for municipal solid waste based on its compression characteristics. **Waste Management**, v. 68, p. 292–306, 2017a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.031>. Acesso em: 19 mar. 2026.

GAO, W.; KAVAZANJIAN JR., E. A constitutive model for municipal solid waste considering mechanical creep and biodegradation-induced compression. **Acta Geotechnica**,

v. 17, p. 1–32, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11440-021-01202-z.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2026.

GAO, Wu; XU, Wenjie; BIAN, Xuecheng; CHEN, Yunmin. A practical approach for calculating the settlement and storage capacity of landfills based on the space and time discretization of the landfilling process. **Waste Management**, v. 69, p. 202–214, 2017b. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X1730569X?pes=vor&utm_source=scopus&getft_integrator=scopus. Acesso em: 28 mar. 2026.

GOMES, Luciana Paulo; CAETANO, Marcelo Oliveira. Municipal solid waste sanitary landfill compressibility study with linear regression application. **Soils and Rocks**, São Paulo, v. 33, n. 3, p. 145–157, set./dez. 2010. Disponível em: <https://www.scopus.com/pages/publications/79952972811?origin=resultslist>. Acesso em: 1 abr. 2026.

GOURC, J.-P.; STAUB, M. J.; CONTE, M. Decoupling MSW settlement into mechanical and biochemical processes: modelling and validation on large-scale setups. **Waste Management**, v. 30, n. 8–9, p. 1556–1568, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.004>. Acesso em: 6 abr. 2026.

HADINATA, Febrian; DAMANHURI, Enri; RAHARDYAN, Benno; WIDYARSANA, I Made Wahyu. Identification of initial settlement of municipal solid waste layers in Indonesian landfill. **Waste Management & Research**, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X18788149>. Acesso em: 2 abr. 2026.

HETTIARACHCHI, Hiroshan. **Mechanics of biocell landfill settlements**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Department of Civil and Environmental Engineering, New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ, 2005. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/a7378613fe734385b2a0e613f1564f53/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>. Acesso em: 20 jun. 2026.

HETTIARACHCHI, Hiroshan. Settlement behavior of bioreactor landfills in North America. In: GEOCONGRESS 2012, 2012. **Proceedings [...]**. Reston: ASCE, 2012. p. 4222–4231. Disponível em: <https://www.scopus.com/pages/publications/84888313435?origin=resultslist>. Acesso em: 6 abr. 2026.

HUBERT, J.; LIU, X. F.; COLLIN, F. Numerical modeling of the long-term behavior of municipal solid waste in a bioreactor landfill. **Computers and Geotechnics**, v. 72, p. 152–170, 2016. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266352X15002165?pes=vor&utm_source=scopus&getft_integrator=scopus. Acesso em: 28 mar. 2026.

HUNTE, C. A.; HETTIARACHCHI, C. H.; MEEGODA, J. N.; HETTIARATCHI, J. P. A. The City of Calgary Biocell Landfill: data collection and settlement predictions using a multiphase model. In: GEOCONGRESS 2012, 2012. **Proceedings [...]**. Reston: ASCE, 2012. p. 4202–4211. Disponível em: <https://www.scopus.com/pages/publications/84888311461?origin=resultslist>. Acesso em: 1 abr. 2026.

JIANG, Yiheng. Landfill settlement prediction study based on Harris Hawks Optimizer-Generalized Regression Neural Network. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER ENGINEERING AND APPLICATION (ICCEA), 5., 2024, Hangzhou.

Proceedings [...]. [S. l.]: IEEE, 2024. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/10603781>. Acesso em: 3 jan. 2026.

JO, Y. S.; CHA, W.; ZEKKOS, D.; KIM, Y.; JANG, Y. S. Long-term settlement model calibration based on field-monitored data at a multi-stage MSW landfill in South Korea. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, 9., 2023, Chania. **Proceedings [...]**. [S. l.]: [s. n.], 2023. p. 127–135. Disponível em:

<https://doi.org/10.53243/ICEG2023-450>. Acesso em: 4 mar. 2026.

JO, Young-Seok; JANG, Yeon-Soo. Long-term and residual settlement behaviour of a multi-staged municipal solid waste landfill, Republic of Korea. **Waste Management & Research**, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X21994750>. Acesso em: 2 abr. 2026.

JO, Young-Seok; JANG, Yeon-Soo. Assessment of waste settlement models based on the long-term settlement data measured at a multi-stage MSW landfill in Korea. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 24, p. 2328–2340, 2022. DOI:

<https://doi.org/10.1007/s10163-022-01490-x>. Acesso em: 14 dez. 2025.

KE, Han; WANG, Yao-shang; CHEN, Yun-min; ZHAN, Liang-tong; XU, Xiao-bing. Settlement calculation of landfills under layerwise summation and case study. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, v. 33, n. 7, p. 1029–1035, 2011. Disponível em:

<https://www.cgejournal.com/en/article/id/14125>. Acesso em: 1 abr. 2026.

KLINK, A. F. C.; VAN ELK, A. G. H. P.; SILVA, J. C. Aplicação de modelos matemáticos para previsão de recalques do aterro de Nova Iguaçu – RJ, Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, p. 37103, 2021. DOI: https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_37103. Acesso em: 24 mar. 2026.

KHOURY, Charbel; ACHEAMPONG, Kofi B.; OFORI-AWUAHL, Kwabena. Geotechnical modeling of landfill expansion stability. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN COMPUTATIONAL TOOLS FOR ENGINEERING APPLICATIONS, 4., 2019. **Proceedings [...]**. IEEE, 2019. Disponível em:

<https://www.scopus.com/pages/publications/85073323427?origin=resultslist>. Acesso em: 26 mar. 2026.

KUMAR, Girish; KOPP, Kevin B.; REDDY, Krishna R.; HANSON, James L.; YEŞİLLER, Nazli. Influence of waste temperatures on long-term landfill performance: coupled numerical modeling. **Journal of Environmental Engineering**, v. 147, n. 3, p. 04020158, 2021.

Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Nazli-](https://www.researchgate.net/profile/Nazli-Yesiller/publication/349695765_Influence_of_Waste_Temperatures_on_Long-Term_Landfill_Performance_Coupled_Numerical_Modeling/links/613fd3945d9d0e131b427ecd/Influence-of-Waste-Temperatures-on-Long-Term-Landfill-Performance-Coupled-Numerical-Modeling.pdf)

[Yesiller/publication/349695765_Influence_of_Waste_Temperatures_on_Long-Term_Landfill_Performance_Coupled_Numerical_Modeling/links/613fd3945d9d0e131b427ecd/Influence-of-Waste-Temperatures-on-Long-Term-Landfill-Performance-Coupled-Numerical-Modeling.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Nazli-Yesiller/publication/349695765_Influence_of_Waste_Temperatures_on_Long-Term_Landfill_Performance_Coupled_Numerical_Modeling/links/613fd3945d9d0e131b427ecd/Influence-of-Waste-Temperatures-on-Long-Term-Landfill-Performance-Coupled-Numerical-Modeling.pdf). Acesso em: 14 dez. 2025.

KUMAR, Girish; REDDY, Krishna R. Effects of unsaturated hydraulic properties of municipal solid waste on moisture distribution and settlement in bioreactor landfills. In: PANAM UNSATURATED SOILS 2017, 2017. **Proceedings [...]**. Reston: ASCE, 2017. p. 165–174. Disponível em:

<https://www.scopus.com/pages/publications/85049667104?origin=resultslist>. Acesso em: 2 abr. 2026.

KUMAR, Girish; REDDY, Krishna R.; FOSTER, Craig. Modeling elasto-visco-bio-plastic mechanical behavior of municipal solid waste in landfills. **Acta Geotechnica**, v. 16, p. 1061–1081, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-020-01072-x>.

LIU, Xiaodong; SHI, Jianyong; QIAN, Xuede; HU, Yadong; PENG, Gongxun. One-dimensional model for municipal solid waste (MSW) settlement considering coupled mechanical-hydraulic-gaseous effect and concise calculation. **Waste Management**, v. 31, n. 12, p. 2473–2483, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.07.013>. Acesso em: 19 mar. 2026.

LIU, Xiaoli; WANG, Yujie; ZHU, Chunying. Settlement analysis of municipal solid waste landfill. **Advanced Materials Research**, v. 243–249, p. 2825–2828, 2011. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.243-249.2825>. Acesso em: 1 abr. 2026.

MARQUES, Afonso Celso Moruzzi. **A study of the compressibility of municipal solid waste**. 2001. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.18.2001.tde-07082007-162407>. Acesso em: 20 jun. 2026.

MARQUES, Afonso Celso Moruzzi; FILZ, George M.; VILAR, Orenco Monje. Composite compressibility model for municipal solid waste. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 129, n. 4, p. 372–378, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:4\(372\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:4(372)). Acesso em: 20 jun. 2026.

POWRIE, William; XU, Xiao-Bing; RICHARDS, David; ZHAN, Liang-Tong; CHEN, Yun-Min. Mechanisms of settlement in municipal solid waste landfills: a review. **Journal of Zhejiang University-SCIENCE A**, v. 20, n. 12, p. 927–947, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1631/jzus.A1900315>. Acesso em: 26 mar. 2026.

QIU, Gang; LI, Liang; SUN, Hongjun. Forecasting the settlement of a bioreactor landfill based on gas pressure changes. **Waste Management & Research**, v. 31, n. 10, p. 1035–1040, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X13490984>. Acesso em: 1 abr. 2026.

QIU, Gang; SUN, Hongjun. Prediction of municipal solid waste landfill settlement with leachate recirculation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON REMOTE SENSING, ENVIRONMENT AND TRANSPORTATION ENGINEERING, 2011. **Proceedings [...]**. IEEE, 2011. p. 1516–1518. DOI: <https://doi.org/10.1109/RSETE.2011.5964518>. Acesso em: 19 mar. 2026.

REDDY, Krishna R.; KUMAR, Girish; GIRI, Rajiv K. Influence of dynamic coupled hydro-bio-mechanical processes on response of municipal solid waste and liner system in bioreactor landfills. **Waste Management**, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X16307772>. Acesso em: 11 fev. 2026.

REDDY, Krishna R.; KUMAR, Girish; GIRI, Rajiv K. Modeling coupled hydro-bio-mechanical processes in bioreactor landfills: framework and validation. **International**

Journal of Geomechanics, v. 18, n. 9, p. 04018102, 2018. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001164](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001164). Acesso em: 2 abr. 2026.

REDDY, Krishna R.; KUMAR, Girish; GIRI, Rajiv K.; BASHA, B. Munwar. Reliability assessment of bioreactor landfills using Monte Carlo simulation and coupled hydro-bio-mechanical model. **Waste Management**, v. 71, p. 558–574, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X17308097>. Acesso em: 10 fev. 2026.

SAFARI, Amirhossein; NOORZAD, Ali; MAMAGHANIAN, Jaber. A finite element study on hydro-thermo-mechanical behaviour of bioreactor landfills. **Indian Geotechnical Journal**, v. 52, n. 6, p. 1464–1475, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40098-022-00636-w>. Acesso em: 2 abr. 2026.

SHARMA, Hari D.; REDDY, Krishna R. **Geoenvironmental engineering: site remediation, waste containment, and emerging waste management technologies**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/265686654_Geoenvironmental_Engineering_Site_Remediation_Waste_Containment_and_Emerging_Waste_Management_Technologies. Acesso em: 11 jun. 2026.

SIDDIQUI, Asif A.; POWRIE, William; RICHARDS, David J. Settlement characteristics of mechanically biologically treated wastes. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 139, n. 10, p. 1676–1689, 2013. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000918](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000918). Acesso em: 1 abr. 2026.

SIMÕES, Gustavo Ferreira; CATAPRETA, Cícero Antônio Antunes. Monitoring and modeling of long-term settlements of an experimental landfill in Brazil. **Waste Management**, v. 33, n. 2, p. 420–430, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.10.001>. Acesso em: 24 mar. 2026.

TAHMOORIAN, Farzaneh; KHABBAZ, Hadi. Performance comparison of a MSW settlement prediction model in Tehran landfill. **Journal of Environmental Management**, v. 241, p. 394–407, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479719315270>. Acesso em: 10 fev. 2026.

VAN GEEL, Paul J.; MURRAY, Kathleen E. Simulating settlement during waste placement at a landfill with waste lifts placed under frozen conditions. **Waste Management**, v. 46, p. 352–361, 2015. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X15300842?getft_integrator=scopus&pes=vor&utm_source=scopus. Acesso em: 23 mar. 2026.

WONG, C. T.; LEUNG, M. K.; WONG, M. K.; TANG, W. C. Afteruse development of former landfill sites in Hong Kong. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 5, n. 6, p. 443–451, 2013. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775513001017?pes=vor&utm_source=scopus&getft_integrator=scopus. Acesso em: 19 mar. 2026.