

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/362

# ANÁLISE CRÍTICA DOS MODELOS DE PREVISÃO E MONITORAMENTO DE RECALQUES MAIS EMPREGADOS EM ATERROS SANITÁRIOS BRASILEIROS

Gustavo Leone Marasco Alves

Discente de Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, gustavo.leone@engenharia.ufjf.br

Jean Cláudio de Andrade Masini

Discente de Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, jean.masini@engenharia.ufjf.br

Júlia Righi de Almeida

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

**RESUMO:** A previsão de recalques em aterros sanitários é fundamental para sua segurança, especialmente diante da heterogeneidade dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no contexto brasileiro. Diversos modelos foram desenvolvidos para prever recalques e antecipar o comportamento destas estruturas, sendo divididos em categorias como adensamento, reológicos, biodegradação e regressão. Este artigo analisa criticamente os modelos mais utilizados em aterros sanitários brasileiros, incluindo o Modelo de Gibson e Lo, Modelo de Sowers, Modelo de Yen & Scanlon, entre outros. O objetivo é agrupar informações disponíveis na literatura, apresentando quatro áreas específicas de estudo e destacando vantagens e desvantagens das metodologias aplicadas. Os resultados indicam que mesmo modelos com formulações mais simples tendem a fornecer resultados satisfatórios, ressaltando a importância de considerar a aplicabilidade dos modelos em diferentes contextos de empreendimento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Modelos de Previsão de Recalque, Aterros Sanitários, Geotecnia Ambiental.

**ABSTRACT:** The prediction of settlements in landfills is crucial for their safety, especially given the heterogeneity of municipal solid waste (MSW) in the Brazilian context. Several models have been developed to predict settlements and anticipate the behavior of these structures, divided into categories such as consolidation, rheological, biodegradation, and regression. This article critically analyzes the most commonly used models in Brazilian landfills, including the Gibson and Lo Model, Sowers Model, Yen & Scanlon Model, among others. The objective is to gather information available in the literature, presenting four specific areas of study and highlighting the advantages and disadvantages of the applied methodologies. The results indicate that even models with simpler formulations tend to provide satisfactory results, emphasizing the importance of considering the applicability of the models in different project contexts.

**KEYWORDS:** Prediction Models for Settlement, Landfills, Environmental Geotechnics.

## 1 INTRODUÇÃO

A previsão de recalques em estruturas de aterros sanitários é crucial no campo da engenharia geotécnica, desempenhando papel fundamental na segurança e durabilidade dessas obras. No contexto brasileiro, as análises de estabilidade e recalques representam desafios significativos, especialmente devido à notável heterogeneidade dos resíduos sólidos urbanos (RSU), demandando a aplicação imprecisa da mecânica dos solos clássica para analisar e antecipar o comportamento desse material. As variações nas propriedades dos resíduos, como coesão, ângulo de atrito, peso específico, e ainda fatores como a geometria, histórico de operação e condições ambientais podem exercer impacto significativo na estabilidade dos aterros sanitários. Com isso, foram desenvolvidos por diversos autores, modelos para previsão de recalques dessas estruturas,

cada um com suas particularidades, podendo ser divididos em 4 categorias segundo Liu *et al.* (2006): adensamento, reológicos, biodegradação e de regressão. Cada modelo emprega em suas formulações diferentes parâmetros, que podem demandar uma complexidade de obtenção distintas. Além dos parâmetros, as características do local, como temperatura e pluviosidade, impactam diretamente na estabilidade dos RSU.

Diante do exposto, foram avaliados os modelos de previsão de recalques mais empregados em aterros sanitários brasileiros, de acordo com a literatura disponível: Modelo de Gibson e Lo (1961), Modelo de Sowers (1973), Modelo de Yen & Scanlon (1975), Modelo observacional de Asaoka (1978), Modelo hiperbólico de Ling *et al.* (1998), Modelo de Creep de Edil *et al.* (1990), Modelo de Bjarngard e Edgers (1990), Modelo de Gandolla *et al.* (1994), Modelo de Meruelo (DIAZ *et al.*, 1995) e o Modelo de Oweis (2006). O objetivo principal do presente artigo é fazer uma análise crítica acerca das aplicações de diferentes metodologias de previsão de recalque e agrupar essas informações disponíveis na literatura atual. Para tanto, através de estudos baseados em 4 diferentes áreas de disposição de resíduos serão analisados os resultados obtidos para as metodologias de previsão de recalque empregadas, avaliando suas vantagens e desvantagens.

## 2 MODELOS DE PREVISÃO DE RECALQUES

O Modelo de Gibson e Lo (1961) é baseado na teoria da compressão secundária do solo. Além disso, é caracterizado como um modelo Reológico, visto que o comportamento e compressão dos resíduos são modelados com utilização de conceitos e parâmetros reológicos dos materiais estudados. Edil, Ranguete e Wuellner (1990) utilizaram o modelo reológico de Gibson e Lo (1961) para avaliação da compressão secundária em solos orgânicos e turfosos, devido o comportamento desse tipo de solo ser semelhante ao de resíduos sólidos, uma vez que ambos possuem elevada quantidade de vazios e compressibilidade primária acelerada. A formulação matemática considera os seguintes parâmetros: altura inicial do aterro, parâmetros de compressibilidade primária e secundária do resíduo, tensão vertical atuante, taxa de compressão secundária e tempo a partir da aplicação de carga (TEIXEIRA, 2015).

No Modelo de Sowers (1973), o autor se fundamentou na teoria de adensamento de Terzaghi (1943) e na utilização de artifícios matemáticos de regressão. Dessa forma, avaliando o recalque em duas parcelas importantes: primários correlacionados com o acréscimo de carga e os secundários que levam em consideração fenômenos biológicos e de acomodamento intrínsecos aos resíduos. O recalque final é obtido a partir da soma das duas parcelas. O modelo de Sowers (1973) avalia em sua formulação os parâmetros: altura inicial do aterro, índice de compressibilidade, tensão efetiva prévia no aterro e sobrecarga efetiva.

Assim como o Modelo de Sowers (1973), o Modelo de Yen e Scanlon (1975) também se fundamenta na teoria de adensamento de Terzaghi (1943), partindo de resultados do monitoramento de três aterros sanitários ao longo de nove anos. Com isso, observaram que a taxa de recalques decresce linearmente com o logaritmo do tempo e cresce com a altura do aterro, formulando um modelo empírico para estimativa da velocidade de recalques. O modelo empírico de Yen & Scanlon (1975) considera os parâmetros a seguir: taxa/velocidade de recalque, recalques medidos, intervalo de tempo entre as medidas, tempo de início da construção, tempo da construção do aterro e outros parâmetros que variam com a espessura e tempo de construção do aterro (TEIXEIRA, 2015).

O Modelo observacional de Asaoka (1978) foi elaborado visando estimar os recalques totais e o coeficiente de consolidação *in situ*, observando o recalque de um acréscimo de carga sobre fundações em solos moles. O modelo é considerado observacional por obter a estimativa dos recalques através de procedimento gráfico, com a intersecção das curvas de recalques dos marcos superficiais analisados.

O Modelo hiperbólico de Ling *et al.* (1998) é baseado na função de regressão matemática hiperbólica. Incorpora em uma única equação as compressões primária e secundária, empregando magnitude do recalque final e taxa de recalque inicial, sendo esses os parâmetros necessários, obtidos através de regressão linear. Para os autores, o recalque final pode estar entre 80% e 95% em relação ao recalque último esperado.

No Modelo de Creep de Edil *et al.* (1990), os autores expandiram o modelo de Gibson e Lo (1961), sendo utilizado para estimar o comportamento de fluência transiente de materiais de engenharia. Segundo Edil *et al.* (1990) muitos fatores afetam o comportamento dos recalques, sendo eles: densidade inicial dos resíduos domésticos ou índice de vazios, conteúdo de material degradável nos resíduos domésticos, altura de preenchimento do aterro, forma de operação do aterro, nível de lixiviado, fatores ambientais como teor de umidade, temperatura, presença e geração de gases no interior do aterro.

A teoria de adensamento de Terzaghi (1943) também foi a fundamentação para a formulação do modelo de Bjarngard e Edgers (1990), proposto a partir da análise de 24 casos históricos de monitoramento de aterros sanitários (PARK *et al.*, 2002), resultando em uma avaliação empírica de recalques. Através dos dados analisados, os autores identificaram um trecho de compressão secundária intermediário e outro a longo prazo. Os parâmetros necessários ao modelo são: altura inicial da camada, tensão vertical efetiva, incremento de tensão vertical, tempo para conclusão da compressão inicial, tempo para conclusão da compressão intermediária, coeficiente de compressão primária, coeficiente de compressão secundária intermediária e coeficiente de compressão secundária de longo prazo foram empregados no modelo (TEIXEIRA, 2015).

No Modelo de Gandolla *et al.* (1994), os autores formularam um modelo exponencial de previsão de recalques baseado em resultados experimentais efetuados com lisímetros, verificando que o recalque é proporcional ao peso específico inicial e sua variação se dá de forma exponencial com o tempo. Os autores consideram em seu modelo os parâmetros: altura inicial dos resíduos, velocidade do recalque, constante de recalque unitário, constante de taxa de decomposição e tempo (KLINK, 2019).

Com a finalidade de prever os recalques secundários, o modelo de Meruelo (DIAZ *et al.*, 1995) parte da formulação que incorpora e relaciona os processos de degradação. O modelo considera peso específico constante e que há uma redução de volume do maciço de resíduo no aterro devido aos processos de biodegradação. Dessa forma, é possível prever os recalques para períodos posteriores ao encerramento das células. Os parâmetros de degradação avaliados no modelo são: coeficientes de perda de massa, altura inicial do aterro, matéria orgânica biodegradável presente no resíduo por ano, coeficiente de hidrólise, tempo de construção do aterro e idade do aterro no início das medições (TEIXEIRA, 2015).

O Modelo de Oweis (2006) leva em consideração o recalque mecânico e de decomposição dos resíduos sólidos durante e após o enchimento das camadas de resíduo no aterro. Segundo Oweis (2006), os maiores valores de recalque ocorrem no final do período de preenchimento do aterro e no pós-enchimento os recalques acumulados mecânicos e de fluência são relativamente pequenos. Para a elaboração da formulação matemática foram feitas as seguintes suposições: taxa uniforme de enchimento, constantes uniformes de decaimento antes e depois do término do preenchimento, peso unitário uniforme e parâmetros de compressibilidade dos resíduos separados em dois períodos, durante e pós-encerramento do projeto.

### 3 ÁREAS DE ESTUDO

#### 3.1 Central de Tratamento de Resíduos de Nova Iguaçu/RJ (CTR-NI)

A CTR Nova Iguaçu fica a aproximadamente 10 km do centro urbano, ocupando uma área de 1.200.000 m<sup>2</sup> e dividida em 4 vales. A CTR-NI foi projetada para uma vida útil de 20 anos, recebendo cerca de 5 mil toneladas de resíduos diariamente. A área de estudo, vale III, recebeu resíduos do tipo domiciliar, limpeza pública, comercial e industrial classe 2, incluindo lodo de estação de tratamento. Ademais, o monitoramento geotécnico contou com 58 marcos de superfície e 4 piezômetros. Em 960 dias foram analisados 8 marcos selecionados. Os dados do monitoramento geotécnico foram empregados na calibração dos modelos de previsão, utilizando as medidas de recalque para obter os parâmetros necessários. No entanto para determinação de alguns parâmetros específicos foi utilizado a ferramenta *Solver*, do programa Microsoft Excel, que aplica o método dos mínimos quadrados. Dessa maneira, determinam-se as constantes ajustando as curvas medidas em campo às curvas teóricas (KLINK, 2019).

#### 3.2 Central de Resíduos do Recreio - Minas do Leão/RS (CRR)

A Central de Resíduos localizada no município de Minas do Leão no Rio Grande do Sul, fica a aproximadamente 80 km da capital. A CRR conta com uma área de 500 ha, sendo 73 ha destinados para o recebimento de RSU, projetada para tempo de operação de cerca de 23 anos, possuindo tecnologia para tratamento do lixiviado e drenagem dos gases gerados na operação do aterro (DENARDIN, 2013). O monitoramento geotécnico foi feito com a utilização de 20 marcos superficiais e 1 inclinômetro, mas para o trabalho de previsão dos recalques, foram analisadas as deformações verticais dos 6 marcos com recalque mais significativo (DENARDIN, 2013). O aterro foi objeto de estudo de Denardin (2013) e Teixeira (2015), sendo que foram empregados os dados do monitoramento geotécnico para obter alguns dos parâmetros necessários

aos modelos matemáticos de previsão de recalques. No entanto, devido ao não conhecimento da sequência construtiva das células que compõem o aterro e da composição inicial dos resíduos e sua posterior degradação, visando a aplicação da formulação matemática dos modelos, alguns parâmetros tiveram de ser estimados ou correlacionados.

### 3.3 Aterro Sanitário de São Leopoldo/RS (CRSL)

As células de resíduos sólidos urbanos compreendem o Aterro Remediado e o Aterro Emergencial Fase I, pertencentes ao aterro sanitário Central de Resíduos de São Leopoldo/RS. Inicialmente, o descarte no local ocorreu sem um projeto de engenharia e manutenção adequados (lixão) pela prefeitura municipal, mas posteriormente, foram desenvolvidos projetos de ampliação e remediação. O monitoramento geotécnico foi conduzido por meio de marcos superficiais que foram distribuídos estrategicamente, sendo 8 marcos superficiais dedicados ao monitoramento de recalques no Aterro Remediado, avaliados no período de fevereiro de 2004 a março de 2011. Além disso, 9 marcos superficiais foram designados para o Aterro Emergencial Fase I, monitorados de novembro de 2007 a março de 2011. Para o trabalho foram analisados os 17 marcos superficiais, visando prever os recalques nas áreas do Aterro Remediado e do Aterro Emergencial Fase I (TEIXEIRA, 2015). Nesse aterro, alguns parâmetros de cálculo (medidas de gases, chorume, biodegradação dos resíduos, entre outros) não foram encontrados e a partir disso foram escolhidos os modelos de previsão de recalque que mais se encaixavam nos dados disponíveis. No entanto, foi necessário a estimativa de alguns parâmetros com o auxílio da ferramenta *Solver*.

### 3.4 Vazadouro de Marambaia em Nova Iguaçu/RJ

Conhecido como "Lixão da Marambaia", o vazadouro atendeu ao município de Nova Iguaçu de 1987 até fevereiro de 2003, quando foi remediado (VAN ELK; CORRÊA; RITTER, 2019). Atualmente o Vazadouro tem área aproximada de 20 ha e está localizado no bairro de Vila de Cava, no Município de Nova Iguaçu. No período de operação, funcionou de forma precária e informal. O volume de RSU e resíduos dos serviços de saúde dispostos no vazadouro até o término de sua vida útil foi estimado em 2.814.751 t (MATTOS, 2005 *apud* VAN ELK; CORRÊA; RITTER, 2019). Devido a pressões dos órgãos ambientais, já que o lixão era localizado às margens do Rio Iguaçu, houve a remediação do mesmo no ano de 2003 após o estabelecimento de um Termo de Ajustamento de Conduta (TAC), visando a recuperação da área degradada. No entanto, o monitoramento geotécnico só foi iniciado no ano de 2008, quando houve a instalação de 20 marcos superficiais. O trabalho de Van Elk, Corrêa e Ritter (2019) na área em questão contou com os dados de monitoramento de 12 marcos, os quais continham medidas mais coerentes. Além disso, foi utilizada a ferramenta *Solver* para adequação dos parâmetros necessários de cada modelo utilizado e visando minimizar o desvio entre as curvas de recalques medidos e calculados.

### 3.5 Agrupamento das informações disponíveis na literatura

Os modelos de recalque empregados nas áreas de disposição de resíduos estudadas e os resultados obtidos encontram-se resumidos na Figura 1.

Modelos	Parâmetros	Aplicação no(s) aterro(s) e magnitude de recalques (mm) ou desvios encontrados (%)	Observação
Gibson e Lo (1961)	H - altura inicial do aterro; a e b - parâmetros de compressibilidade primária e secundária do resíduo; $\lambda/b$ - taxa de compressão secundária	CRR: -1,14% CRSL (Aterro Remediado e Fase I): 2,90% e 2,83%	CRR: boa concordância CRSL: boa concordância
Sowers (1973)	H- espessura inicial da camada. t1 - tempo para conclusão da compressão primária; t2 - tempo de estimativa de recalque; C' $\alpha$ - coeficiente de compressão secundária; S - recalque secundário	CTR-NI: 160 mm a 365 mm Vazadouro de Marambaia: 80 mm a 281 mm	CTR-NI: estabilização nos 2000 dias Vazadouro de Marambaia: boa concordância
Yen e Scanlon (1975)	m - taxa de recalque ou velocidade de recalque; $\Delta H$ - recalques medidos; $\Delta t$ - intervalo de tempo entre as medidas; a e b - parâmetros que variam com a espessura do aterro e tempo de construção	CRR: 72% e -14,92% CRSL (Aterro Remediado e Fase I): 12,78% e -11%	CRR: fraca concordância, CRSL: fraca concordância
Asaoka (1978)	$\beta_0$ - constante de inclinação da reta; $\beta_1$ - intercepto da reta; $\Delta H_{ult}$ - recalque final	CRR: variação para cada marco devido ao método utilizado CRSL (Aterro Remediado e Fase I): variação para cada marco devido ao método utilizado	CRR: resultados satisfatórios, mas não simula o ajuste de curva CRSL: resultados satisfatórios, mas não simula o ajuste de curva
Ling et al. (1998)	H0 - altura inicial do aterro; a e b - valores obtidos na regressão linear; $\rho_0$ - taxa de recalque inicial; Sult - recalque último esperado (tempo infinito); $\xi_{ult}$ - deformação última	CTR-NI: 160 a 365 mm CRR: 3,4% e 1,81% CRSL (Aterro Remediado e Fase I): -6,37% e 1,22% Vazadouro de Marambaia: 66 mm a 781 mm	CTR-NI: estabilização em 2000 dias CRR: resultados satisfatórios, mas não acompanhou a estabilização do aterro CRSL: boa concordância Vazadouro de Marambaia: é recomendável a calibração com dados de campo
Edil et al. (1990)	S(t) - recalque no tempo; H - altura inicial do resíduo; $\Delta\sigma$ - acréscimo de pressão; m - compressibilidade de referência; n - taxa de compressão	CRR: valores variando de -4,69% a 58,8% CRSL (Aterro Remediado e Fase I): de -8,39% a -19,03% e de 6,66% a -7,51%	CRR: em maiores tempos houve grande desvio CRSL: em maiores tempos houve grande desvio para a Fase Remediada, mas boa concordância
Bjarngard e Edgers (1990)	H - altura do aterro; Ca1 - coeficiente de compressão secundária intermediária; Ca2 - coeficiente de compressão secundária de longo prazo; tk - tempo de transição entre as fases de compressão secundária	CRR: 1,7% e -0,56% CRSL (Aterro Remediado e Fase I): 12,71% e 0,03%	CRR: necessidade de ajuste dos coeficientes para obter valores satisfatórios CRSL: boa concordância
Gandolla et al. (1994)	H0 - altura inicial dos resíduos; S - recalque total; K - constante de taxa de decomposição; a - constante de recalque unitário; t - tempo em meses	CTR-NI: 350 mm a 900 mm CRR: 33,97% CRSL (Aterro Remediado e Fase I): 47,45% e 15,52%	CTR-NI: estabilização em 8000 dias CRR: fraca concordância CRSL (Aterro Remediado e Fase I): boa concordância, visto que os valores medidos e calculados se aproximam por uma linha de 45°
Meruelo (DIAZ et al., 1995)	H - altura inicial do aterro em metros; COD - quantidade de matéria orgânica biodegradável presente no resíduo por ano; kh - coeficiente de hidrólise; SS - recalque secundário; Tc - tempo de construção do aterro; t0 - idade do aterro no início das medições; t' - tempo; $\alpha$ - coeficiente de perda de massa	CTR-NI: 160 mm a 365 mm CRR: -1,99% CRSL (Aterro Remediado e Fase I): 7,40% e 0,38% Vazadouro de Marambaia: 81 mm a 164 mm	CTR-NI: estabilização em 2000 dias CRR: boa aderência CRSL: boa aderência Vazadouro de Marambaia: boa concordância
Oweis (2006)	H - espessura no final do preenchimento; $\Delta S_s$ - recalque de fluência adicional; tc - tempo para completar o preenchimento; t - tempo em meses após encerramento; C' $\alpha$ - coeficiente de compressão secundária; H0 - altura inicial; Sd - recalque de decomposição num tempo $t \geq t_c$ ; K - constante de decaimento durante o enchimento; K' - constante de decaimento pós enchimento; Tc - tempo para conclusão do preenchimento do aterro; tpc - tempo maior que tc; $\beta$ - fração de massa de resíduo que possa potencialmente ser convertida em gás	CTR-NI: valores crescentes Vazadouro de Marambaia: 273 mm a 1038 mm	CTR-NI: não houve estabilização nem em 200 anos Vazadouro de Marambaia: resultados conservadores

Figura 1. Parâmetros analisados em cada modelo de previsão de recalques, aplicação nas áreas de estudos e resultados obtidos (adaptado de KLINK, 2019; DENARDIN, 2013; TEIXEIRA, 2015; VAN ELK; CORRÊA; RITTER, 2019).

#### 4 ANÁLISE CRÍTICA

Os modelos empíricos, como os propostos por Yen e Scanlon (1975), Gandolla *et al.* (1994) e Ling *et al.* (1998), são reconhecidos pela sua simplicidade. No entanto, sua principal desvantagem reside na impossibilidade de prever recalques em projetos, exigindo uma quantidade substancial de dados iniciais para ajuste do modelo. Os modelos de Ling *et al.* (1998) e Sowers (1973) são destacados por sua simplicidade e razoável estimativa dos recalques, porém, a calibração com dados de campo é essencial para sua aplicação.

O modelo de Sowers (1973) apresenta a vantagem de possuir uma formulação simples com poucos parâmetros, mas sua limitação reside na dificuldade de determinação confiável do índice de vazios dos RSU. O modelo de Yen e Scanlon (1975), embora útil quando ajustado com dados de campo, torna-se inconsistente em longos períodos, podendo gerar recalques negativos. O método de Asaoka (1978) é apontado como interessante para o acompanhamento e previsão do recalque final, enquanto o modelo hiperbólico de Ling *et al.* (1998) se mostra vantajoso por sua independência em relação ao tempo de construção e espessura da camada de lixo, mas sua aplicabilidade está relacionada às velocidades de recalque, exigindo melhores correlações para tais variáveis. Os modelos de Edil *et al.* (1990) e Bjarngard e Edgers (1990) são reconhecidos por suas formulações empíricas, mas a determinação dos parâmetros a partir de registros históricos dificulta sua extrapolação para condições diferentes. O modelo de Meruelo (DIAZ *et al.*, 1995), baseado em parâmetros físicos, é considerado mais realista por alguns autores (KLINK, 2019), mas sua aplicação requer uma compreensão detalhada das características dos resíduos e das condições do aterro. Finalmente, o modelo Oweis (2006), por sua sofisticação, apresenta muitos parâmetros estimados de forma indireta, o que pode levar a uma expectativa superestimada da vida útil do aterro.

Em todos os trabalhos abordados, a base comparativa dos resultados obtidos e apresentados pelos modelos se limita a comparação das curvas geradas pelo monitoramento geotécnico, sendo, portanto, evidenciada a carência de parâmetros fundamentais para análise dos dados, como as próprias normas, que são justificadas por esse assunto ser relativamente recente. Na calibração de alguns modelos foram utilizados dados de entrada próprios, advindos de ensaios e monitoramento no aterro, mas para determinação de alguns parâmetros foi necessário fazer estimativa do mesmo utilizando o artifício da regressão, principalmente para o coeficiente de compressão primária dos resíduos. Ademais, os trabalhos abordam a convergência dos modelos, não citando se os valores de recalques encontram-se em intervalos satisfatórios e seguros ou até mesmo, em casos de risco, não é abordado quais medidas devem ser tomadas. Diante disso, a Tabela 1, proposta por Grassi (2005) *apud* Boscov (2008) pode ser utilizada para análise de recalques, pois apresenta como parâmetros a velocidade do mesmo e critérios para tomadas de decisão em cada situação.

Tabela 1: Critérios para tomada de decisão de deslocamento no Aterro CDR Pedreira (adaptado de GRASSI, 2005 *apud* BOSCOV, 2008).

Nível de alerta	Velocidade de deslocamento horizontal e vertical (cm/dia)	Periodicidade recomendada para as leituras	Critérios de decisão e ações preventivas
1	Menor que 0,25	Semanal	Aceitável
2	Entre 0,25 e 1,0	Dois dias	Verificação in situ de eventuais problemas
3	Entre 1,0 e 4,0	Diária	Verificação in situ e intervenções localizadas
4	Entre 4,0 e 14,0	Diária	Paralisação imediata das operações no aterro e intervenções localizadas
5	Maior que 14,0	Diária	Declaração de estado de alerta, paralisação imediata das operações, acionamento da defesa civil para as providências cabíveis

O monitoramento de recalque se inicia, no mínimo, após o encerramento da disposição dos RSU com o alteamento final dos aterros sanitários, e em muitos casos a falta de conhecimento do histórico do aterro, os métodos empregados durante o alteamento e o monitoramento tardio se tornam impasses para a previsão de recalques, pois conflitam com dados necessários para muitos modelos.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Segundo Righi (2017), no que diz respeito à atividade relacionada à disposição de RSU, o aterro ainda é considerado pelos operadores o processo mais simples e econômico, já que, na maioria das vezes, os cuidados necessários no período pós-fechamento não são contabilizados. Devido a esse panorama, há grande contaminação nessas áreas, visto que o lixiviado gerado em aterros fechados pode ter igual ou maior potencial de contaminação que os ativos. Nesse sentido é possível observar a dificuldade de aplicação dos modelos de previsão de recalque, visto a necessidade de parâmetros e medições, que muitas vezes não são possíveis de serem adquiridas nos aterros sanitários brasileiros, devido a falta de monitoramento e ausência de instrumentos necessários ao controle ambiental.

O acompanhamento da estabilidade de aterros sanitários ainda é um assunto relativamente novo, portanto carece de fundamentos e normas. Essa lacuna se evidencia na análise dos estudos apresentados, nos quais a comparação direta entre o comportamento dos modelos de previsão de recalque e os dados de campo medidos frequentemente se baseia na mecânica dos solos clássica. Contudo, falta a menção de um intervalo de confiança, que estabeleceria uma margem segura para os recalques, bem como medidas a serem adotadas caso os resultados obtidos não atendam aos critérios de aceitação. Ademais, a Geotecnia Ambiental carece da implementação e desenvolvimento de novas tecnologias voltadas à realidade da disposição de resíduos no Brasil, uma vez que as tecnologias existentes necessitam por vezes de parâmetros inacessíveis. Nesse caso, é necessário a estimativa de muitos deles, impactando diretamente nos resultados obtidos em todas as fases de análise, diminuindo a segurança e aumentando a incerteza em relação ao comportamento dos aterros sanitários brasileiros.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Universidade Federal de Juiz de Fora pelo ensino gratuito e de qualidade, e ainda ao apoio do Programa de Educação Tutorial da Engenharia Civil (PET Civil) financiado pelo Ministério da Educação (MEC).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASAKA, A. Observational procedure of settlement prediction. *Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. V. 18, n.4, p.87-101, 1978. Disponível em: <[https://www.jstage.jst.go.jp/article/sandf1972/18/4/18\\_4\\_87/pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/sandf1972/18/4/18_4_87/pdf/-char/ja)>. Acesso em: 04 de março de 2024.
- BOSCOV, Maria Eugenia Gimenez. *GEOTECNIA AMBIENTAL*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 248 p
- DENARDIN, Gabriela Pippi. *ESTUDO DOS RECALQUES DO ATERRO SANITÁRIO DA CENTRAL DE RESÍDUOS DO RECREIO – MINAS DO LEÃO/RS*. 2013. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7816>>. Acesso em: 25 out. 2023.
- EDIL, T. B.; RANGUETTE, V. J.; WUELLNER, W. W. *Settlement of municipal refuse. In: Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice: ASTM STP 1070*. American Society of Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania, p. 225–239, 1990. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/279910316/Settlement\\_of\\_municipal\\_refuse](https://www.researchgate.net/publication/279910316/Settlement_of_municipal_refuse)>. Acesso em: 04 de março de 2024.
- GIBSON, R. E.; LO, K. Y. A theory of consolidation for soils exhibiting secondary compression. *Acta Polytechnica Scandinavica*, c. 10, n. 296, p. 1-16, 1961 .

- KLINK, Annik Frasso Corrêa. *Previsão de recalques em aterros sanitários utilizando modelos de compressibilidade: estudo de caso da Central de Tratamento de Resíduos de Nova Iguaçu-RJ*. 2019. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Tratamento e Destino Final de Resíduos Sólidos, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <<https://www.bdtd.uerj.br:8443/handle/1/10878>>. Acesso em: 23 out. 2023.
- LING, H.I et al. Estimation of municipal solid waste landfill settlement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 124, n. 1, p. 21 - 28, 1998. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/245293674> Estimation of Municipal Solid Waste Landfill Settlement>. Acesso em: 04 de março de 2024.
- OWEIS, I. S. Estimate of landfill settlements due to mechanical and decompositional process. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, n. 132, p. 644-650, 2006. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/238179776> Estimate of Landfill Settlements Due to Mechanical and Decompositional Processes>. Acesso em: 05 mar. 2024.
- PARK, H.; LEE, S. R.; DO, N. Y. Evaluation of Decomposition Effect on Long-Term Settlement Prediction for Fresh Municipal Solid Waste Landfills. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. n. 128, p. 107-118, 2002. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/245293938> Evaluation of Decomposition Effect on Long-Term Settlement Prediction for Fresh Municipal Solid Waste Landfills>. Acesso em: 05 mar. 2024.
- RIGHI, Júlia de Almeida. *PROPOSTA DE ÍNDICE DE AVALIAÇÃO DE ATERROS DE RESÍDUOS DESATIVADOS A PARTIR DO POTENCIAL POLUIDOR DO LIXIVIADO*. 2017. 190 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, COPPE UFRJ, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/7342/1/876554.pdf>>. Acesso em: 11 mar. 2024.
- SOWERS, G. F. *Settlement of waste disposal fills*. In: eighth international conference on soil mechanics and foundation engineering. Moscow, 1973. Disponível em: <<https://www.issmge.org/publications/publication/settlement-of-waste-disposal-fills>>. Acesso em: 04 de março de 2024.
- TEIXEIRA, Marília Coelho. *PREVISÃO E MONITORAMENTO DE RECALQUES EM ATERROS SANITÁRIOS/ ESTUDO DE CASOS: CENTRAL DE RESÍDUOS DE RECREIO – MINAS DO LEÃO/RS E SÃO LEOPOLDO/RS*. 2015. 217 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7642>>. Acesso em: 27 out. 2023.
- TERZAGHI, K. (1943) *Theoretical Soil Mechanics*. Nova York: John Wiley and Sons. Disponível em: <[https://labmekanikatanah.files.wordpress.com/2013/04/karl\\_terzaghi\\_theoretical\\_soil\\_mechanicsbookfi-org.pdf](https://labmekanikatanah.files.wordpress.com/2013/04/karl_terzaghi_theoretical_soil_mechanicsbookfi-org.pdf)>. Acesso em: 04 de março de 2024.
- VAN ELK, Ana Ghislane Pereira; CORRÊA, Leandro Rangel; RITTER, Elisabeth. Análise de recalques em longo prazo no vazadouro de Marambaia, Nova Iguaçu, Rio de Janeiro. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, [S.L.], v. 24, n. 3, p. 547-557, maio 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522019176034>. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/esa/a/zvSNvqDYyRzCgVH3VRn3Fcv/?lang=pt>>. Acesso em: 09 mar. 2024.
- Yen, B.C. & Scanlon, B. (1975) Sanitary landfill settlement rates. *Journal of Geotechnical Division*, v. 101:5, p. 475-487.