XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/114

Reflexões sobre a interpretação de registros de monitoramento de movimentações em aterros sanitários e sua aplicação como indicador de estabilidade estrutural

Gustavo Ferreira Simões
UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, gustavo@desa.ufmg.br

Cícero Antônio Antunes Catapreta
SLU-PBH, Belo Horizonte, MG, Brasil, catapret@slu.pbh.br

Caio César de Sousa Mello
UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, caiocsmello@gmail.com

RESUMO: O monitoramento de movimentações em aterros sanitários fornece informações essenciais para a gestão dessas estruturas. Além da complexidade do comportamento dos RSU, a operação de aterros geralmente ocorre sob restrições orçamentárias para instrumentação, exigindo análise criteriosa sobre a eficiência e a precisão das tecnologias de levantamento utilizadas. Apesar dos avanços nas técnicas de sensoriamento remoto, métodos de aquisição de dados pontuais ainda são amplamente empregados. Entretanto, problemas operacionais simples são frequentemente observados, comprometendo a correta interpretação dos registros. O trabalho propõe reflexões sobre alguns aspectos importantes da análise dessas movimentações. Considerando o caráter vetorial dos deslocamentos, questiona-se o significado de determinar separadamente magnitudes e velocidades de movimentos verticais e horizontais. Também se discute a possibilidade de estabelecer faixas de velocidade que indiquem níveis de segurança tanto durante a operação quanto no longo prazo, bem como formas de incorporar o caráter vetorial dos movimentos em um indicador de estabilidade. Com base em dados reais de monitoramento de diferentes aterros sanitários brasileiros, o estudo discute essas questões em nível operacional. Além disso, são apresentadas alternativas metodológicas para auxiliar e complementar a interpretação dos registros, bem como recomendações voltadas à melhoria da qualidade dos dados, visando à avaliação contínua da estabilidade estrutural dos aterros.

PALAVRAS-CHAVE: Aterros sanitários, monitoramento geotécnico, recalques, estabilidade de taludes

ABSTRACT: The monitoring of settlements in landfills is essential for the decision-making process involved in the management of these structures. In addition to the complexity of MSW behavior, landfill operations are often subject to budgetary constraints for instrumentation, requiring careful analysis of the efficiency and accuracy of the surveying technologies used. Despite the advancements in remote sensing techniques, point data acquisition methods remain widely employed. However, simple operational problems are often observed, which can compromise the correct interpretation of records. The paper discusses important aspects of these movements' analysis. Given the vector nature of the displacements, the validity of determining the magnitudes and rates of vertical and horizontal movements separately is questioned. The potential for establishing velocity ranges that indicate safety levels during operation and over time is also discussed, as well as methods for incorporating the vector nature of movements into a stability indicator. The study utilizes empirical monitoring data from several Brazilian landfills to discuss these issues at the operational level. Furthermore, it outlines methodological alternatives to assist and complement the interpretation of records, as well as recommendations aimed at improving data quality, with a view to the continuous assessment of the structural stability of landfills.

KEYWORDS: Landfills, geotechnical monitoring, settlements, slope stability

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento geotécnico de aterros sanitários é uma atividade de alta complexidade devido à natureza do material constituinte do maciço. Composto majoritariamente por resíduos sólidos urbanos (RSU) de caráter biodegradável, essas estruturas apresentam recalques com ordens de grandeza superiores às de obras geotécnicas convencionais, decorrentes de processos mecânicos e degradação biológica.

O monitoramento de movimentações em aterros sanitários fornece importantes informações que auxiliam a tomada de decisão de operadores e gestores, incluindo aspectos relacionados à vida útil, à manutenção de sistemas de drenagem superficial e camada de cobertura final, ao planejamento do uso pós-fechamento e, principalmente, à segurança estrutural. Paralelamente à complexidade técnica, a gestão de aterros sanitários é condicionada por orçamentos restritos para instrumentação, o que exige uma análise criteriosa sobre a eficiência e a precisão das tecnologias de levantamento adotadas.

É notável a evolução das tecnologias de sensoriamento remoto, como a aerofotogrametria com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), o LiDAR (*Light Detection and Ranging*), o radar fixo (InSAR) e o GNSS (*Global Navigation Satellite System*) que trabalham com o conceito de nuvens de pontos e modelos digitais de elevação (MDE).

No entanto, a utilização dos métodos de aquisição de dados pontuais, com utilização de instrumentos de precisão convencionais, como estações totais, ainda pode ser considerada a principal técnica utilizada nos aterros sanitários brasileiros. Embora a precisão desses instrumentos seja adequada, muitas vezes problemas simples, como o mal posicionamento dos bastões e do prisma receptor, ainda são observados no momento da coleta da informação em campo, causando variações erráticas no padrão das movimentações. Há ainda situações onde a ausência de padronização e registro do sistema de referência cartográfico (SRC) e referência posicional (*datum*) ocasiona incompatibilidade na análise entre levantamentos topográficos históricos. Tais intercorrências acabam dificultando, ou mesmo impedindo, uma interpretação adequada dos dados.

Nesse contexto, o trabalho objetiva destacar alguns aspectos para reflexão, relacionados à interpretação das informações obtidas, tais como: existe um padrão de movimentação esperado? Considerando a característica vetorial dos movimentos, qual é o significado de determinar magnitudes e velocidades de movimentos verticais e horizontais de forma dissociada? Considerando o complexo comportamento dos RSU, principalmente sua perda de massa com tempo, é possível estabelecer faixas de velocidades que definam níveis de segurança durante a operação e na situação de longo prazo, após o encerramento? Quais seriam estas faixas de velocidade para cada fase da vida de um aterro sanitário? É possível estabelecer uma forma de incorporar o caráter vetorial dos movimentos em um indicador de estabilidade?

A partir de dados reais de monitoramento de movimentações em diferentes aterros sanitários brasileiros e tendo como foco a utilização dos registros como instrumento de auxílio na contínua avaliação da estabilidade estrutural dessas estruturas, essas questões são discutidas no nível operacional, apresentando alternativas de metodologias para auxílio e complementação na interpretação dos registros históricos de monitoramento, bem como recomendações para a melhoria da qualidade dos registros.

2 MONITORAMENTO DE MOVIMENTAÇÕES

O monitoramento de movimentações em aterros sanitários é uma parte integrante do monitoramento geotécnico de tais estruturas e, em conjunto com o monitoramento de poro-pressões internas de líquidos e gases, tem como objetivos fornecer elementos para a contínua avaliação da estabilidade estrutural, além de possibilitar a avaliação da integridade de elementos de projetos, tais como sistemas de drenagem superficial e camadas de cobertura final.

Historicamente, a literatura técnica prioriza predominantemente avaliações baseadas em recalques verticais, importantes para a calibração de modelos e contínua atualização da vida útil dos aterros sanitários (eg. Giorgini *et al*., 2021; Klink *et al*., 2021). A avaliação das movimentações horizontais (eg. Cepolina *et al*., 2004; Simões *et al*., 2007; Rocha *et al*., 2016; van Elk *et al*., 2018; Bezerra *et al*., 2024), embora menos explorada nas publicações científicas, possui o potencial de, em conjunto com os recalques verticais, possibilitar uma real interpretação dos deslocamentos, que, por serem grandezas vetoriais, não devem ser analisadas de forma dissociada.

A definição de níveis de segurança em empreendimentos geotécnicos, como as instalações de disposição de rejeitos de mineração, é reportada na literatura e em regulamentações (ANM, 2025). No contexto desse tipo de estrutura e também em barragens de terra, onde, em condições normais de estabilidade, os deslocamentos horizontais esperados são diminutos, a utilização de registros do monitoramento de movimentações tem o grande potencial de, a partir da avaliação das magnitudes de forma vetorial e, principalmente, das velocidades observadas, permitir a avaliação do nível de segurança das obras.

No caso dos aterros sanitários, a dinâmica de deformações ganha um maior grau de complexidade, dada a natureza heterogênea dos materiais, somada à biodegradabilidade dos RSU, cuja velocidade de degradação é extremamente variável com o tempo. Esse conjunto de fatores é responsável por movimentos verticais e horizontais naturais de intensidades e velocidades variáveis com o tempo, dificultando o estabelecimento de níveis de segurança que caracterizem situações de instabilidade, principalmente quando consideradas as componentes verticais e horizontais de forma isolada.

Em aterros sanitários de grande porte, com taludes de grande extensão em relação à sua altura (condição de deformação plana), o movimento esperado em uma condição de instabilidade deve ser perpendicular ao talude, conforme a situação hipotética indicada na Figura 1. Nessa situação, o caráter vetorial do movimento pode ser analisado em duas dimensões, materializando o vetor resultante do deslocamento. A posição do vetor resultante, quando situada abaixo da superfície original do talude, indica redução do volume do aterro, processo natural associado ao comportamento geomecânico e à degradabilidade intrínseca do RSU, e sugere uma situação de estabilidade. A análise dissociada das parcelas horizontal e vertical dos deslocamentos não possibilitaria tal constatação.

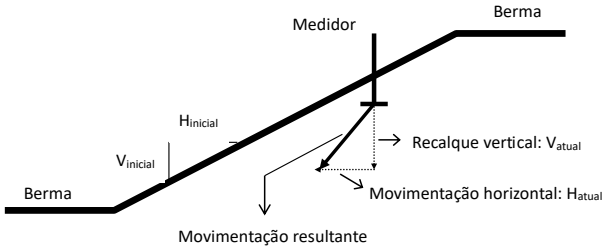


Figura 1. Esquema de movimentação em perfil

3 TECNOLOGIAS DE MONITORAMENTO

3.1 Métodos de Aquisição de Dados Pontuais: Estação Total e GNSS

Os métodos tradicionais de monitoramento baseiam-se na coleta de dados pontuais, onde a análise da estabilidade do maciço depende da interpretação conjunta de uma rede de marcos superficiais. A Estação Total permanece como a ferramenta mais difundida devido à sua capacidade de alcançar precisão milimétrica, importante para a detecção e monitoramento de deslocamentos. Contudo, a eficácia do método é sensível a fontes de erro operacional. O posicionamento do bastão e o nivelamento do prisma pelo operador podem introduzir variações espúrias, resultando em um comportamento "ziguezagueante" nas séries temporais de coordenadas absolutas. Tais flutuações, muitas vezes, não representam movimentos reais do maciço, mas sim ruídos instrumentais e de manuseio. Para mitigar essas inconsistências, é recomendada a fixação de prismas de rosca ou o uso de bipés, reduzindo a excentricidade e o erro de verticalidade.

No que tange ao uso de sistemas globais de navegação por satélite, o emprego de GNSS de precisão via métodos RTK (Real Time Kinematic), embora ofereça agilidade operacional, apresenta limitações críticas quanto à escala de monitoramento de recalques (Siebert e Teizer, 2014). A acurácia típica desses sistemas situa-se na casa centimétrica, o que se mostra insuficiente para o acompanhamento rigoroso de medidores de recalque, onde variações milimétricas são determinantes. Assim, tanto a Estação Total quanto o GNSS geram amostragens discretas que, embora precisas em sua natureza pontual, exigem uma densidade amostral elevada e uma interpretação sistêmica para validar as condições globais de segurança do aterro.

3.2 Tecnologias de Nuvem de Pontos e Malhas Posicionais: VANT, LiDAR e Radar

Em contraste com os métodos pontuais, as tecnologias de sensoriamento remoto, como a aerofotogrametria com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), o LiDAR (Light Detection and Ranging) e o radar fixo (InSAR), trabalham com o conceito de nuvens de pontos e modelos digitais de elevação (MDE). Estas técnicas representam o maciço como uma superfície contínua, permitindo uma análise holística da morfologia do aterro e de seus deslocamentos relativos.

A aerofotogrametria destaca-se pela rapidez e pela qualidade da geoinformação gerada a custos competitivos. Entretanto, sua precisão é dependente da distribuição de pontos de controle em campo (GCPs). Como a acurácia final tende a ser centimétrica, a técnica é ideal para o cálculo de volumes e verificação de taludes, mas perde capacidade de refinamento quando comparada à leitura direta em medidores de recalque (Mello *et al*. 2022). Já o LiDAR, como sensor ativo, oferece uma densidade de pontos superior e maior precisão na representação do terreno, sendo eficaz para monitorar o deslocamento relativo de grandes massas de forma sequencial, embora possua um custo de mobilização mais elevado (Nex e Remondino, 2014).

O radar fixo terrestre representa o estado da arte no monitoramento de alta frequência, utilizando a interferometria para medir mudanças na fase das ondas eletromagnéticas com precisão submilimétrica. Esta técnica provê um mapeamento contínuo da deformação de toda a face visível do aterro (Crosetto, *et al*. 2016).

4 EXEMPLOS

São apresentados e discutidos a seguir alguns exemplos de registros de movimentações observados em aterros sanitários brasileiros. Em todos os exemplos os registros foram obtidos utilizando estações totais, por diferentes equipes de topografia. Como forma de destacar aspectos importantes da análise, foi utilizada a hipótese de existência de uma direção característica de um eventual movimento indicador de instabilidade, correspondente à direção normal à face do talude, sendo considerado o azimute desta direção como referência. São apresentados gráficos de evolução dos recalques verticais, variação da posição em planta em relação às coordenadas Norte e Leste, variação dos azimutes dos deslocamentos horizontais instantâneos (com indicação de uma faixa de ±20° em torno do azimute esperado do movimento indicativo de uma potencial situação de instabilidade) e, em alguns casos, a posição do vetor de deslocamento resultante em perfil. Com exceção dos exemplos do aterro sanitário experimental (4.1) e aterro encerrado (4.2), destaca-se que o tempo indicado não se refere à idade dos resíduos e sim ao recorte utilizado na análise. Nas figuras da posição do vetor de deslocamento resultante em perfil, é indicada em azul uma inclinação de referência (1V:2H), usualmente utilizada em projetos. Nas figuras da variação da posição em planta é indicada a direção do eventual movimento esperado em uma situação de instabilidade, considerando a geometria do aterro.

4.1 Medidor Instalado em um Aterro Experimental (Série Temporal Extensa)

A Figura 2 apresenta a evolução das deformações verticais ao longo dos primeiros 4.000 dias (cerca de 11 anos) de um medidor instalado em um aterro sanitário experimental e corresponde à idade dos RSU. Observa-se um comportamento típico, resultado dos processos mecânicos e biológicos de degradação dos resíduos. A curva demonstra uma velocidade de recalque mais acentuada nos períodos iniciais, evoluindo para uma tendência de estabilização em estágios avançados, o que valida a qualidade do monitoramento quanto à componente vertical.

Entretanto, a Figura 3, referente a todo o período, revela uma dispersão errática das coordenadas horizontais (Norte e Leste). Dado que a geometria do aterro experimental induz a uma condição de deformação unidimensional (1D), a expectativa teórica seria de deslocamentos horizontais nulos ou desprezíveis. O registro gráfico apresenta um padrão ziguezagueante de natureza não-geotécnica, conforme detalhado no recorte da Figura 4. Este fenômeno é um problema de medição típico de levantamentos convencionais com estação total, onde a excentricidade no posicionamento do prisma e a falta de verticalidade do bastão geram variações nas coordenadas. Além disso, as mudanças bruscas de "nuvens" de pontos observadas na Figura 3 sugerem variações instrumentais ou de *datum*, possivelmente associadas à alternância das equipes de campo e à falta de padronização nos procedimentos de compatibilização de bancos de dados ao longo das décadas de monitoramento.

A Figura 5, que apresenta a distribuição do azimute dos deslocamentos horizontais e as velocidades horizontais instantâneas, corrobora a tese de predominância de erros operacionais sobre movimentos reais do maciço. Em uma situação de instabilidade ou deslocamento real, os vetores de velocidade apresentariam uma direção preferencial definida (azimute preferencial), concentrando-se em um quadrante específico voltado para a face livre do talude, em aterros onde a condição bidimensional ocorre. Contudo, observa-se uma distribuição homogênea dos vetores, com as velocidades instantâneas (na ordem de 0,2 a 1,0 cm/dia) apontando para todas as direções de forma aleatória. Essa ausência de tendência direcional confirma que os deslocamentos registrados são espúrios, resultantes da imprecisão milimétrica de cada leitura pontual. Portanto, a análise integrada demonstra que, embora o medidor registre movimentações horizontais, estas não traduzem a cinemática do aterro, mas sim a incerteza intrínseca do método de levantamento quando não submetido a um rigoroso protocolo de posicionamento e estabilização do prisma.

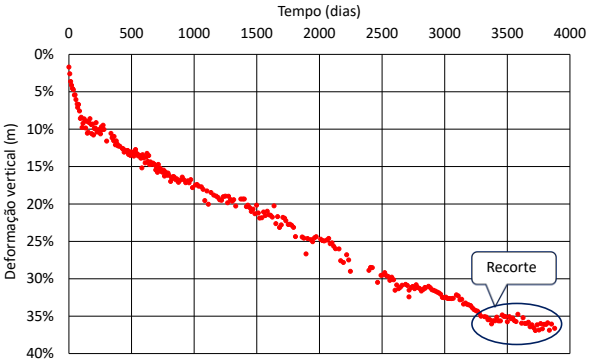


Figura 2. Evolução das deformações verticais

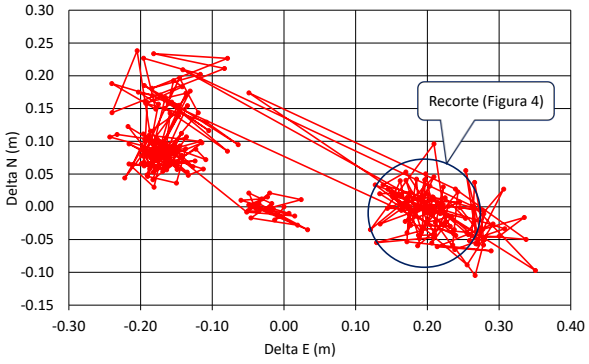


Figura 3. Variação da posição em planta do medidor

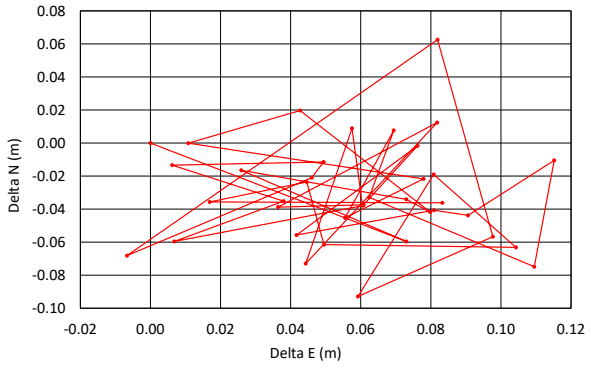


Figura 4. Recorte da posição em planta do medidor

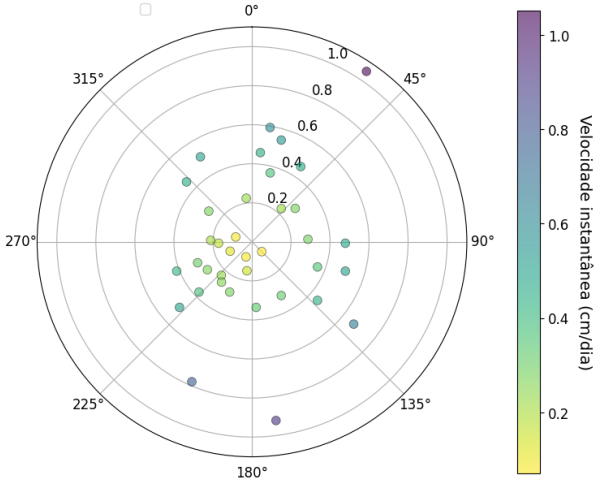


Figura 5. Variação do azimute dos deslocamentos e velocidades horizontais

4.2 Medidor Instalado em Área Encerrada de Aterro de Grande Porte (Série Temporal Extensa)

Diferente do exemplo anterior de comportamento 1D, este caso apresenta um medidor submetido a movimentações mais complexas e direcionadas. A extensão da série histórica, que corresponde aos 4 primeiros anos do monitoramento de uma camada de resíduos de 2 anos de idade, é relevante para amenizar a variabilidade de curto prazo e evidenciar a cinemática real do maciço. Conforme observado na Figura 6, o recalque vertical apresenta uma curva de estabilização clássica, atingindo patamares próximos a 3,5 metros, no período. No plano horizontal (Figura 7), a trajetória do medidor revela uma direção preferencial nítida (sentido Noroeste), com um deslocamento acumulado superior a 3,0 metros.

A magnitude e a persistência deste movimento ao longo de quatro anos confirmam o vetor resultante apontando consistentemente para o azimute de 300°, que coincide com a perpendicular à face livre do talude. Apesar da clareza da tendência global, a análise detalhada da trajetória e das velocidades instantâneas revela a

presença de ruído operacional remanescente. Na Figura 7, nota-se que a linha de movimentação não é perfeitamente retilínea, apresentando pequenos desvios laterais ao longo do eixo principal. A Figura 8 demonstra que, embora grande parte das velocidades instantâneas se concentre na faixa de 300°±20° (destacada em verde), há um número significativo de registros apontando para direções divergentes, incluindo quadrantes opostos ao movimento real. A Figura 9 apresenta o vetor resultante das movimentações em perfil, sem a exclusão de nenhum registro, indicando que, no ponto considerado, a movimentação não sugere problemas de instabilidade, pois o vetor resultante tem inclinação superior à original do talude (1V:2H). No entanto, ressalta-se que, com a inclusão de todos os registros, inclusive movimentos horizontais em outras direções que não a esperada, essa avaliação deve ser vista criteriosamente.

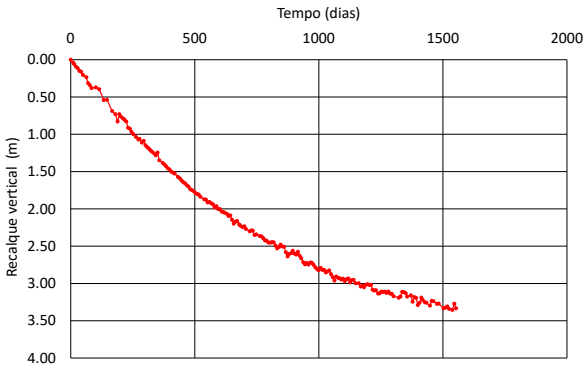


Figura 6. Evolução dos recalques verticais

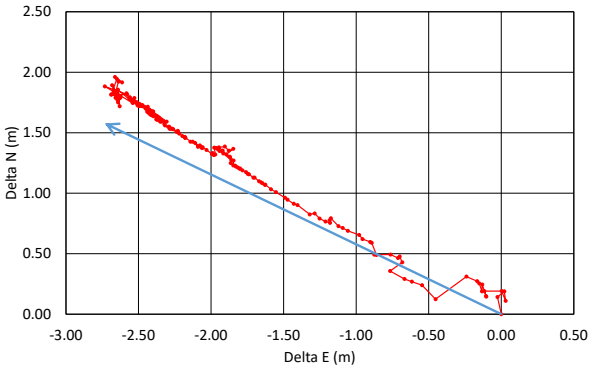


Figura 7. Variação da posição em planta do medidor

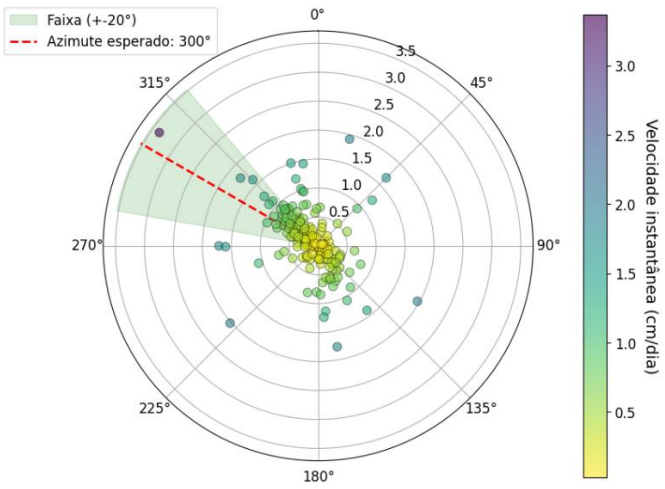


Figura 8. Variação do azimute dos deslocamentos e velocidades horizontais

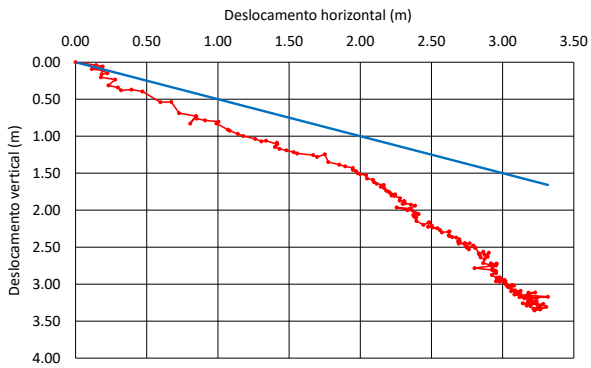


Figura 9. Vetor em perfil

4.3 Medidor Instalado em Área Encerrada de Aterro de Grande Porte (Série Temporal Curta)

Diferente do caso anterior, onde a escala plurianual suavizava visualmente as oscilações, a série de um ano (Figuras 10 e 11) destaca como os erros sistemáticos de posicionamento podem influenciar na visualização da tendência real de movimentação do maciço.

Na Figura 10, observa-se um recalque acumulado de aproximadamente 0,60 m em um ano. Embora a tendência descendente seja clara e coerente com comportamento esperado dos resíduos, a curva apresenta degraus e pequenas elevações pontuais. Em um processo real, não era de se esperar que o material recuperasse altura, portanto, essas oscilações positivas são evidências diretas de erros de nivelamento da estação ou variações de visada que afetam a precisão milimétrica da leitura. A Figura 11 apresenta a trajetória horizontal do medidor. Embora exista um vetor preferencial direcionado para Nordeste (azimute aproximado de 40°), a linha de deslocamento é marcada por um padrão acentuadamente ziguezagueante. Este comportamento é o

reflexo direto das dificuldades operacionais citadas anteriormente, como a excentricidade do prisma, onde cada ponto que se desvia bruscamente da linha azul (tendência esperada) representa uma leitura onde possivelmente o bastão não estava perfeitamente centrado ou verticalizado. E também ao tamanho da série histórica, pois em uma série de 10 anos (exemplo 4.2), esse "ziguezague" parece um detalhe, mas em uma série de 1 ano, ele representa parcela notável da amplitude do movimento registrado, o que pode levar a interpretações errôneas sobre a velocidade instantânea do deslocamento.

O gráfico polar de velocidades instantâneas (Figura 12) revela um comportamento aleatório. O azimute esperado para o movimento do talude é de 40° (faixa verde). Contudo, nota-se uma elevada dispersão de pontos fora desta zona, com velocidades de até 1,0 cm/dia apontando para direções opostas ao movimento esperado. Este espalhamento dos vetores de velocidade instantânea confirma que a componente de erro topográfico é de mesma ordem de grandeza que o movimento real do aterro nesta escala de tempo. O movimento real existe (tendência para 40°), mas ele está atenuado em um ruído de medição decorrente do manuseio do equipamento em campo. A Figura 13 apresenta o vetor resultante das movimentações em perfil, sem a exclusão de nenhum registro, sugerindo que no ponto considerado, mesmo com todos os eventuais erros de posicionamento, a identificação de uma direção que não indica problemas de instabilidade, pois tem inclinação superior à original do talude (1V:2H). No entanto, ressalta-se que, com a inclusão de todos os registros, inclusive movimentos horizontais em outras direções que não a esperada, essa avaliação deve ser vista criteriosamente.

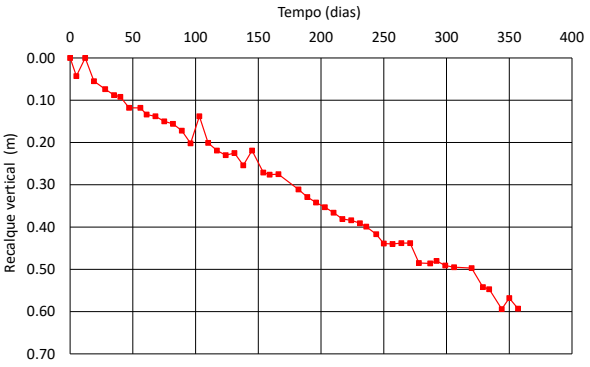


Figura 10. Evolução dos recalques verticais

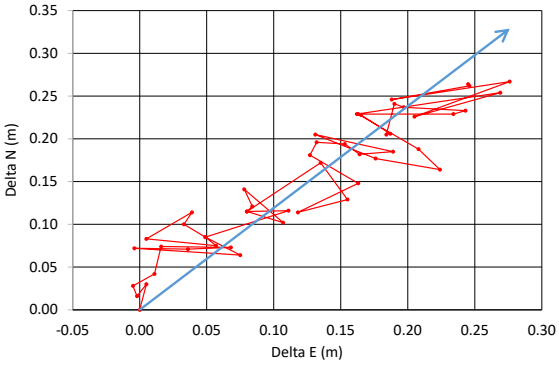


Figura 11. Variação da posição em planta do medidor

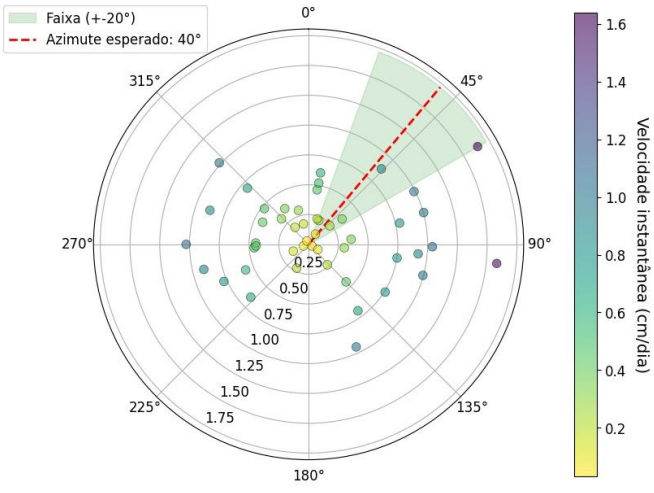


Figura 12. Variação do azimute dos deslocamentos e velocidades horizontais

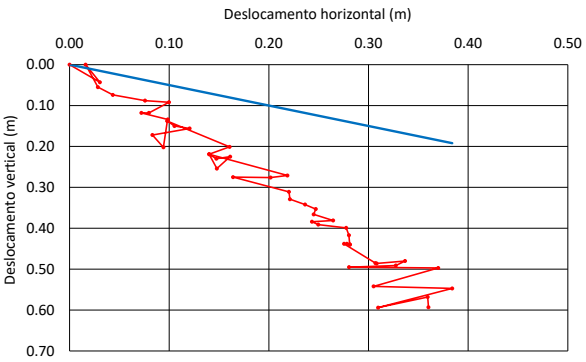


Figura 13. Vetor em perfil

4.4 Medidor Instalado em Área Encerrada de Aterro de Grande Porte (Série Temporal Curta)

Neste exemplo é apresentado um recorte de 2,5 anos dos registros de movimentações de um medidor localizado em área cuja disposição de resíduos, com duração de 2 anos, foi encerrada há aproximadamente 21 anos. Na

Figura 14 observa-se um recalque acumulado de aproximadamente 0,16 m no período, indicando uma estabilização das movimentações, esperada em função da idade dos resíduos. No entanto, são também observados degraus e pequenas elevações pontuais, da mesma forma que na Figura 10. A Figura 15 apresenta a variação da posição em planta, onde, em função das magnitudes observadas (±2,0 cm), fica nítido o padrão ziguezagueante, sugerindo novamente as mesmas falhas de posicionamento dos dispositivos de medição. A Figura 16 confirma isso, pois embora possam ser observados alguns pontos dentro da faixa esperada das movimentações e respectivas velocidades instantâneas de deslocamento (azimute 300°±20), existe uma dispersão significativa, o que torna a interpretação do vetor de deslocamentos (Figura 17) sem significado, sugerindo simplesmente que o ponto considerado só apresenta recalques verticais.

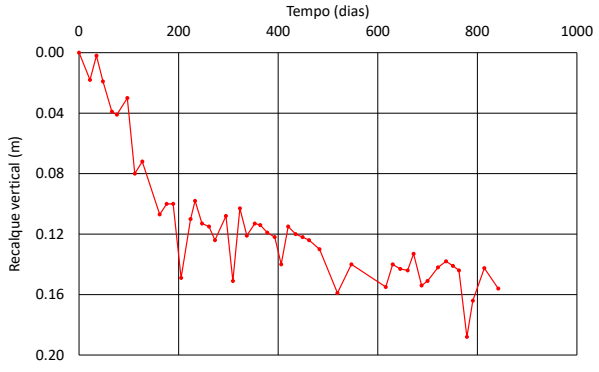


Figura 14. Evolução dos recalques verticais

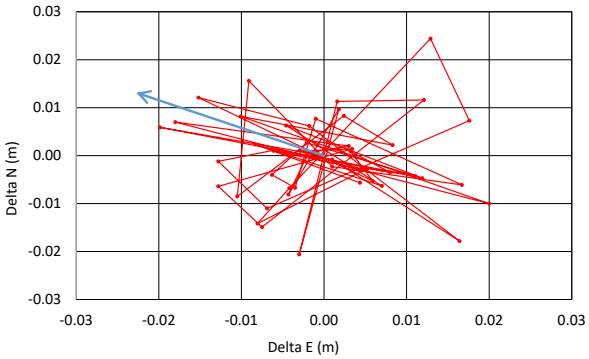


Figura 15. Variação da posição em planta do medidor

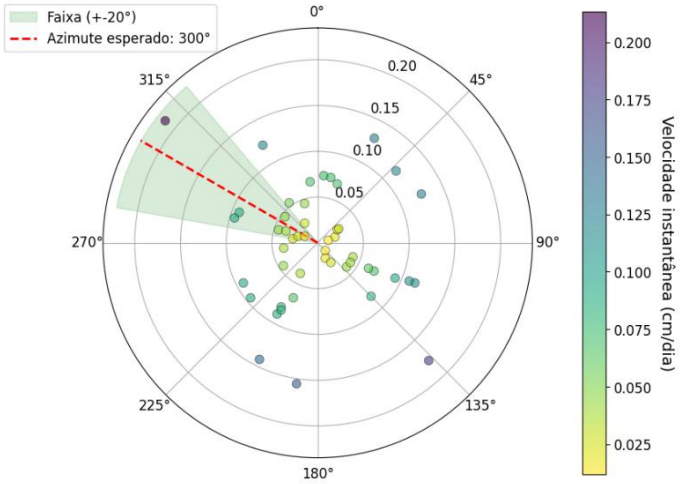


Figura 16. Variação do azimute dos deslocamentos e velocidades horizontais

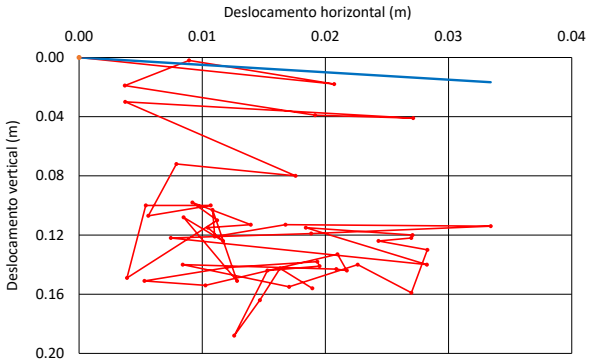


Figura 17. Vetor em perfil

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas medições pontuais, que representam o método de mais fácil acesso para a realidade operacional dos aterros, a alta frequência de leitura – diária ou semanal – é uma vantagem estratégica. No entanto, essa facilidade de acesso deve ser acompanhada por um rigor técnico estrito. Sem o uso de dispositivos de auxílio, como bipés ou prismas de rosca fixos, a variação no posicionamento do bastão e o erro de nivelamento da bolha pelo operador introduzem excentricidades milimétricas. Esses erros se traduzem em um comportamento ziguezagueante nas séries temporais, onde o deslocamento absoluto registrado oscila em torno de um ponto central, criando uma falsa percepção de movimento horizontal do maciço que, na realidade, é apenas uma falha de repetibilidade na centragem do prisma.

Em contrapartida, a aplicação de modelos baseados em nuvens de pontos e Modelos Digitais de Elevação (MDEs) oferece uma perspectiva complementar de maior escala temporal. Devido à logística e ao custo de processamento, tais levantamentos são aplicados em intervalos mensais, trimestrais ou anuais,

permitindo a comparação subsequente da morfologia do aterro. Enquanto os métodos pontuais monitoram o comportamento discreto dos marcos com alta frequência, os MDEs permitem enxergar o deslocamento do maciço como um todo, identificando deformações globais, abaulamentos e variações de crista que as medições isoladas poderiam omitir.

Portanto, a análise de deslocamentos horizontais deve ser integrada: as medições pontuais fornecem o dado imediato e frequente, desde que o operador possua o entendimento técnico dos possíveis erros de campo e utilize acessórios que garantam a verticalidade. Já o monitoramento por malha posicional (fotogrametria, LiDAR ou radar) valida essas informações em uma análise de massa, garantindo que o engenheiro geotécnico diferencie com segurança um ruído de medição de um movimento real de massa.

Ressalta-se também que a identificação das direções dos movimentos horizontais, em relação ao azimute do movimento esperado em uma situação de instabilidade, pode contribuir para a correta interpretação dos registros, permitindo a avaliação de velocidades representativas. A questão da definição de faixas de velocidade que caracterizem níveis de segurança também deve considerar as diferentes fases de um aterro sanitário, o que, dada a complexidade do comportamento geomecânico e biológico dos RSU, ainda precisa ser melhor entendida e investigada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Mineração (ANM) (2025). *Resolução ANM nº 220*, de 16 de outubro de 2025. Estabelece a disciplina aplicável às barragens de mineração. Brasília.

Bezerra, D.E.; Bahia, V.E.A.G.; Bezerra, A.L.R.; Araujo Neto, C.L.; Monteiro, V.E.D.; Melo, M.C. (2024). Monitoring Horizontal Displacements in Landfills Using Instrumentation and Geostatistics. *International Journal of Advances in Engineering and Technology*, v. 17, p. 330-340, 2024.

Cepollina, M.; Kaimoto, L.S.A.; Motidome, M.J.; Leite, E.F. (2004). Monitoramento em Aterros Sanitários durante a Operação: Desempenho Mecânico e Ambiental. In: Sem. Res. Sólid. São Paulo. *Anais*... ABGE.

Crosetto, M.; Monserrat, O.; Cuevas-González, M.; Devanthéry, N.; Crippa, B. (2016). Persistent Scatterer Interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, [s. l.], v. 115, p. 78-89.

Giorgini, M.G.; Catapreta, C.A.A.; Simões, G.F. (2021). Modelagem de recalques de longo prazo de um aterro sanitário experimental - Análise crítica de três modelos empíricos. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, 14, p. 107-121.

Klink, A.F.C. van Elk, A.G.H.P., Silva, J.C. (2021) Aplicação de Modelos Matemáticos para Previsão de Recalques do Aterro de Nova Iguaçu – RJ, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 44, 37103.

Mello, C.C.S., Salim, D.H.C., Simões, G.F. (2022). UAV-based landfill operation monitoring: a year of volume and topographic measurements. *Waste Management*. 137, 253–263.

Nex, F., Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Appl. Geomat*. 6 (1), 1–15.

Rocha, A.A.A.; Abreu, A.E.S.; Oliveira, F.J.P.; Kamijji, T.S.M.M. (2016). Níveis de Alerta para Monitoramento de Aterros Sanitários Encerrados. In: 18 COBRAMSEG, Belo Horizonte. *Anais*... ABMS.

Siebert, S., Teizer, J. (2014). Mobile 3d mapping for surveying earthwork using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Autom. Constr*. 41, 1–14.

Simões, G.F.; Catapreta, C.A.A.; Martins, H.L. (2007). Monitoramento de Deslocamentos Superficiais como Ferramenta de Auxílio à Avaliação da Estabilidade de Aterros Sanitários - Estudo de Caso Para o Aterro Sanitário de Belo Horizonte, MG. In: 6 REGEO, Recife. *Anais*... ABMS.

van Elk, A.G.H.P.; Azevedo, G.S.S.; Corrêa, L.R.; Ritter E. (2018). Análise dos Deslocamentos Verticais e Horizontais do Vazadouro de Marambaia, Nova Iguaçu – RJ. In: 19 COBRAMSEG, Salvador. *Anais*...ABMS.