

ESTRUTURAS DISTINTAS, PRINCÍPIOS COMUNS: BARRAGENS E ATERROS SANITÁRIOS

DISTINCT STRUCTURES, COMMON PRINCIPLES: EARTH DAMS AND
SANITARY LANDFILLS

Ciências Exatas e da Terra, Engenharias • 10/04/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/775740054](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/775740054)

Bryan Almeida da Silva¹

Aderian dos Santos Rodrigues²

Marcelo Rassy Teixeira³

RESUMO

Este artigo apresenta uma análise comparativa entre barragens de terra e aterros sanitários, com ênfase nas similaridades geotécnicas que governam o comportamento dessas estruturas. A pesquisa, de natureza qualitativa e baseada em revisão bibliográfica, aborda de forma integrada três eixos principais: estabilidade de taludes, instrumentação geotécnica e ocorrência de acidentes. No que se refere à estabilidade, são discutidos os métodos de análise aplicados a ambas as estruturas, bem como a influência de parâmetros como resistência ao cisalhamento, condições de saturação e geração de pressões intersticiais. Em relação à instrumentação, destaca-se o uso de piezômetros como ferramenta fundamental para o monitoramento das pressões neutras e para a interpretação do comportamento interno dos maciços. Adicionalmente, são analisados acidentes geotécnicos em barragens e aterros sanitários, evidenciando mecanismos de ruptura e fatores desencadeantes comuns, como falhas de drenagem, elevação da poropressão e deficiência de monitoramento. Os resultados indicam que, apesar das diferenças funcionais, ambas as estruturas compartilham fundamentos essenciais da mecânica dos solos e apresentam comportamentos análogos sob determinadas condições. Nesse contexto, observa-se que práticas consolidadas na engenharia de barragens podem ser aplicadas ao gerenciamento de aterros sanitários, contribuindo para o aumento da segurança, da confiabilidade e da eficiência no controle de riscos geotécnicos.

Palavras-chave: Pressões intersticiais. Acidentes geotécnicos. Barragens de terra. Aterros sanitários. Estabilidade de taludes.

ABSTRACT

This article presents a comparative analysis between earth dams and sanitary landfills, emphasizing the geotechnical similarities that

govern the behavior of these structures. The research, qualitative in nature and based on a literature review, addresses three main axes in an integrated manner: slope stability, geotechnical instrumentation, and the occurrence of accidents. Regarding stability, the study discusses the analysis methods applied to both structures, as well as the influence of parameters such as shear strength, saturation conditions, and the generation of pore pressures. In terms of instrumentation, the use of piezometers is highlighted as a fundamental tool for monitoring pore pressures and interpreting the internal behavior of the mass. Additionally, geotechnical accidents in dams and landfills are analyzed, identifying common failure mechanisms and triggering factors such as drainage failures, increased pore pressure, and deficiencies in monitoring. The results indicate that, despite functional differences, both structures share essential principles of soil mechanics and exhibit analogous behavior under certain conditions. In this context, it is observed that practices consolidated in dam engineering can be applied to landfill management, contributing to increased safety, reliability, and efficiency in geotechnical risk control.

Keywords: Pore pressures. Geotechnical accidents. Earth dams. Sanitary landfills. Slope stability.

1. INTRODUÇÃO

A engenharia geotécnica consolidou-se como um dos principais campos da engenharia civil, sendo responsável por compreender o comportamento de solos e rochas sob diferentes condições de carregamento e fluxo. Seus fundamentos foram estabelecidos a partir do desenvolvimento da mecânica dos solos, com destaque para o conceito de tensão efetiva, que se tornou central na análise

do comportamento dos solos e na previsão de sua resistência e deformabilidade (TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996).

Segundo LAMBE e WHITMAN (1969), o comportamento mecânico dos solos está diretamente relacionado à interação entre tensões efetivas, condições de drenagem e presença de água nos vazios. Nesse sentido, a resistência ao cisalhamento e os processos de deformação são fortemente influenciados pelas condições hidráulicas do meio, o que torna indispensável a compreensão do papel das pressões intersticiais nas análises geotécnicas. A influência da água sobre as propriedades dos solos também é amplamente discutida na literatura, destacando-se sua atuação na redução da resistência e no aumento da compressibilidade (DAS, 2010).

Estruturas como barragens de terra e aterros sanitários assumem papel relevante devido à sua importância econômica, ambiental e social. Apesar de apresentarem finalidades distintas, ambas são constituídas por maciços de materiais terrosos ou heterogêneos, cujo comportamento depende do equilíbrio entre forças resistentes e solicitantes ao longo de superfícies potenciais de ruptura. Essa abordagem constitui a base dos métodos de equilíbrio limite aplicados em análises de estabilidade de taludes (DUNCAN; WRIGHT, 2005).

De acordo com FETTER (2001), a presença e o fluxo de fluidos no interior dos maciços exercem influência significativa na estabilidade global das estruturas. A percolação em meios porosos pode alterar o estado de tensões efetivas, favorecendo a ocorrência de instabilidades quando há elevação das pressões intersticiais. Esse comportamento é particularmente relevante em sistemas onde há

acúmulo ou circulação contínua de fluidos, como em barragens e aterros sanitários.

A avaliação da segurança dessas estruturas depende do monitoramento contínuo de suas condições internas. A instrumentação geotécnica permite o acompanhamento de variáveis como deslocamentos e pressões intersticiais, sendo fundamental para a interpretação do comportamento dos maciços ao longo do tempo. Entre os instrumentos utilizados, destacam-se os piezômetros, amplamente empregados em diferentes tipos de estruturas geotécnicas (DUNNICLIFF, 1988).

KOERNER e SOONG (2000) destacam que, no contexto dos aterros sanitários, falhas estruturais estão frequentemente associadas a problemas relacionados à estabilidade e ao controle de fluidos no interior dos maciços. A análise de casos históricos evidencia que a ausência de monitoramento adequado pode comprometer significativamente a segurança dessas estruturas. De forma complementar, ROWE (2005) ressalta que o desempenho a longo prazo desses sistemas depende diretamente do controle das condições hidráulicas e do comportamento dos materiais utilizados.

Diante desse panorama, torna-se pertinente analisar barragens de terra e aterros sanitários sob uma perspectiva integrada, buscando identificar os princípios geotécnicos comuns que governam seu comportamento. Assim, este trabalho tem como objetivo evidenciar, por meio de revisão bibliográfica, as similaridades entre essas estruturas, com ênfase na estabilidade de taludes e no uso de instrumentação geotécnica e em acidentes comuns envolvendo ambas as estruturas, contribuindo para o aprimoramento das práticas de análise e monitoramento na engenharia geotécnica.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA OU REVISÃO DA LITERATURA

O presente referencial teórico tem como objetivo fundamentar a análise comparativa entre barragens e aterros sanitários sob a ótica da estabilidade geotécnica e do monitoramento estrutural. Para isso, são abordados os principais conceitos, métodos e desafios relacionados ao comportamento de maciços terrosos e de resíduos, com ênfase na influência da poropressão, nos mecanismos de ruptura e nas técnicas de instrumentação.

Conforme destacado por Boscov (2008), a compreensão do desempenho dessas estruturas depende da integração entre modelos teóricos, dados de campo e práticas de monitoramento, especialmente em cenários de elevada complexidade geotécnica. Nesse contexto, o referencial teórico reúne contribuições de autores, normas técnicas e estudos de caso que permitem estabelecer as bases necessárias para a análise crítica proposta neste trabalho, direcionando a discussão para a segurança, confiabilidade e evolução dos métodos de monitoramento aplicados a barragens e aterros sanitários.

A geotecnia enfrenta desafios técnicos e ambientais que influenciam diretamente a segurança e o desempenho de estruturas como barragens e aterros sanitários. Entre os principais entraves está a modelagem do comportamento de solos e resíduos, que, conforme Giorgini (2019), pode apresentar limitações quando não calibrada com dados de monitoramento de longo prazo, levando à subestimação de recalques.

A análise de riscos também se destaca como elemento essencial, sendo reforçada por Vianna (2015), que evidencia a importância da

integração entre instrumentação, Ações de campo e modelagem para a prevenção de falhas. Além disso, fatores climáticos, especialmente chuvas intensas, exercem influência significativa na estabilidade dos taludes, tornando os sistemas de drenagem fundamentais, conforme estabelecido pela ABNT NBR 11682:2009.

Outro desafio relevante está na detecção de vazamentos e no controle da percolação em barragens, com destaque para o uso de métodos geofísicos, como demonstrado por Saravalle (1973). Soma-se a isso a variabilidade dos parâmetros geotécnicos, que introduz incertezas nos projetos e pode comprometer a segurança das estruturas, como apontado por Silva (2014).

A poropressão é um dos fatores mais críticos tanto em barragens quanto em aterros sanitários, influenciando diretamente a estabilidade dos maciços. Estudos como os de Silva (2020), Porciúncula (2020) e Tiago Barbosa da Silva (2020) demonstram que sua geração está associada à umidade, à velocidade de construção e à presença de líquidos nos poros, podendo reduzir a resistência ao cisalhamento e favorecer processos de instabilidade.

Por fim, após desastres recentes, a gestão de riscos geotécnicos passou a exigir maior rigor normativo, com destaque para a Lei nº 12.334/2010. Nesse contexto, a geotecnia se consolida como uma área em constante evolução, que demanda integração entre modelagem, monitoramento e regulamentação para garantir a segurança e a sustentabilidade das estruturas.

A estabilidade de taludes é fundamental na engenharia geotécnica, envolvendo a análise e prevenção de movimentos de massa. Guidicini e Nieble (1984) destacam que sua compreensão depende

da interação entre fatores geológicos e geomecânicos, enquanto Ahrendt (2005) ressalta que a escolha dos métodos deve considerar dados disponíveis, tempo e recursos.

Os métodos de análise evoluíram em três etapas. Os métodos de equilíbrio limite, como os de Fellenius, Bishop e Janbu, baseiam-se no balanço entre forças resistentes e atuantes, sendo amplamente aplicados pela simplicidade, conforme Lambe e Whitman (1969). Os métodos numéricos passaram a representar de forma mais realista o comportamento dos solos, incorporando deformações e poropressão, como destaca Duncan (1996). Já os métodos probabilísticos introduzem a variabilidade dos parâmetros e a análise da probabilidade de falha, segundo Christian, Ladd e Baecher (1994).

O fator de segurança é o principal parâmetro de avaliação. A ABNT NBR 11682:2009 define valores mínimos de 1,3 para taludes naturais e 1,5 para contenção. Segundo Das (2007), ele representa a relação entre forças resistentes e atuantes, sendo que valores maiores que 1 indicam estabilidade, conforme Schuler (2010).

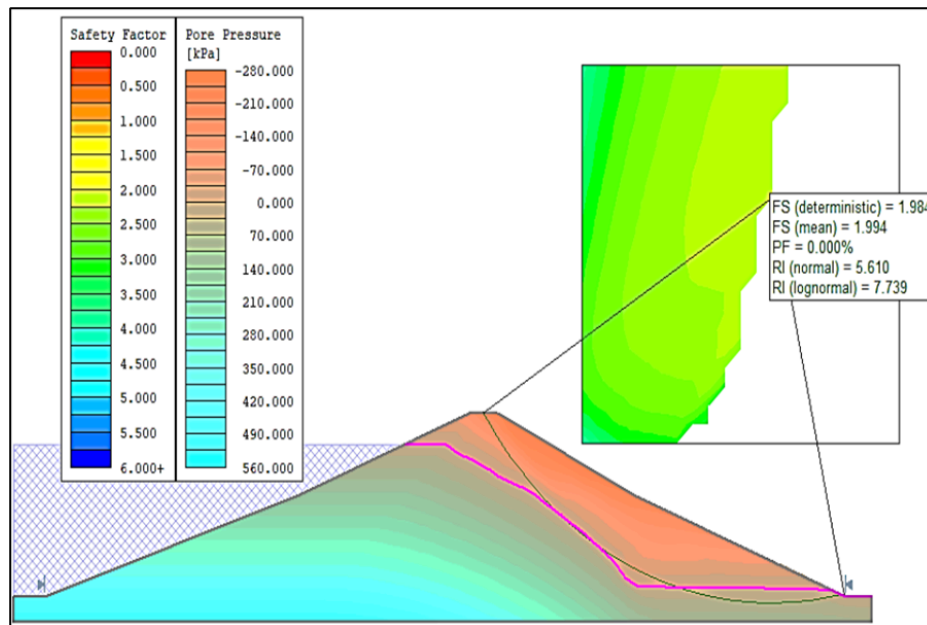
A análise de estabilidade de taludes evoluiu de abordagens simplificadas para métodos mais rigorosos, acompanhando o avanço da engenharia geotécnica. O método de Fellenius (1936) introduziu a técnica das fatias com simplificações nas forças interatuantes, sendo útil para análises preliminares, porém limitado em situações complexas. Posteriormente, Bishop (1955) aprimorou o método ao considerar o equilíbrio de momentos, aumentando a precisão. Janbu (1954) ampliou a análise para superfícies não circulares, enquanto Morgenstern e Price (1965), juntamente com Spencer (1967), desenvolveram métodos completos que satisfazem

simultaneamente o equilíbrio de forças e momentos, sendo mais adequados para análises complexas (Fellenius, 1936; Bishop, 1955; Janbu, 1954; Morgenstern e Price, 1965; Spencer, 1967). A escolha do método depende da geometria do talude, da qualidade dos dados e do nível de precisão requerido (Xia et al., 2025; Zieher et al., 2017; Zein; Karim, 2017; Saltelli et al., 2017; Cheng; Jiang, 2012).

Na aplicação prática, a estabilidade de taludes é crítica em barragens e aterros sanitários devido ao elevado potencial de impacto socioambiental. Em barragens, eventos como os rompimentos de Mariana e Brumadinho evidenciaram a necessidade de análises mais robustas e monitoramento contínuo (Botelho et al., 2021; Schnaid; Mello; Dzialoszynski, 2020; Williams, 2021).

Estudos de caso em barragens demonstram a aplicação desses métodos. Santos Junior (2019) aplicou diferentes metodologias e verificou que os métodos de Janbu e Fellenius tendem a fornecer fatores de segurança menores, enquanto o método de Morgenstern-Price apresenta resultados mais conservadores.

Figura 1 - perfil da superfície de ruptura da barragem de Orós pelo método de Morgenstern-Price

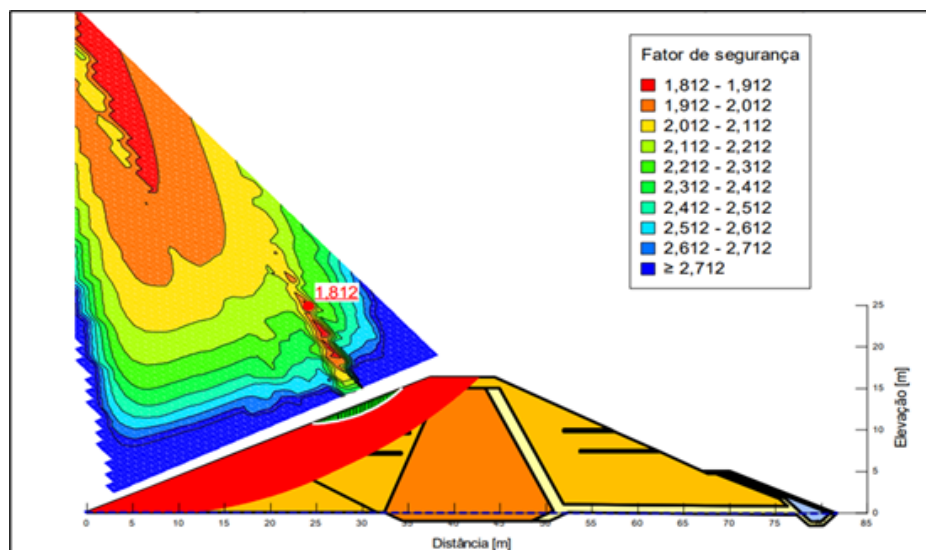


Fonte: Santos Júnior (2019).

Arthur Sausen Netto (2019) analisou a estabilidade da Barragem de Iraí utilizando o método de Bishop Simplificado, obtendo fatores de segurança satisfatórios e destacando a importância da análise probabilística para avaliação da confiabilidade estrutural.

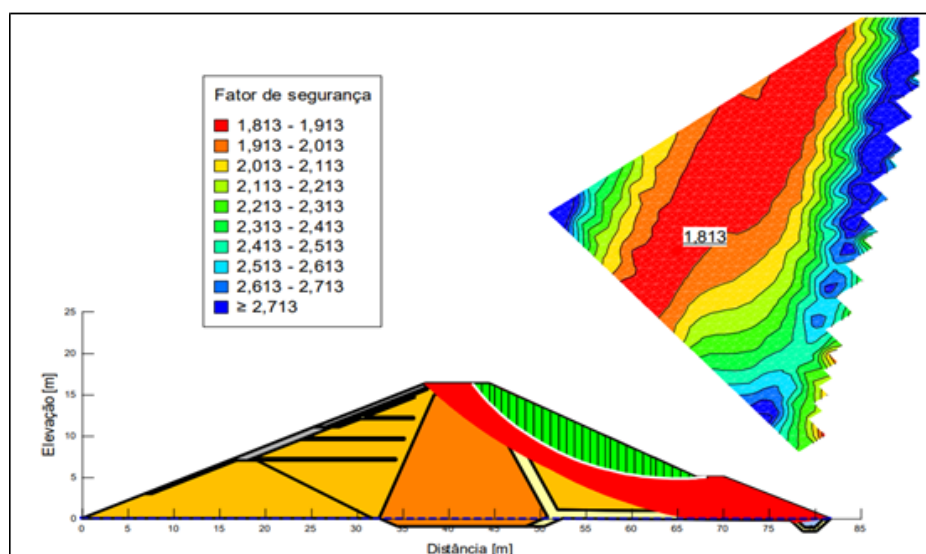
As figuras 2 e 3, demonstram respectivamente a superfície crítica de ruptura a montante pelo método de Bishop e a Superfície crítica de ruptura a jusante pelo método de Bishop.

Figura 2 - perfil da superfície crítica de ruptura a montante pelo método de Bishop



Fonte: Sausen Netto (2019).

Figura 3 - perfil da Superfície crítica de ruptura a jusante pelo método de Bishop



Fonte: Sausen Netto (2019).

Complementarmente, Giaccon Junior (2018) demonstrou que análises probabilísticas são essenciais, pois os métodos determinísticos podem subestimar a probabilidade de falha ao desconsiderar a variabilidade dos parâmetros geotécnicos.

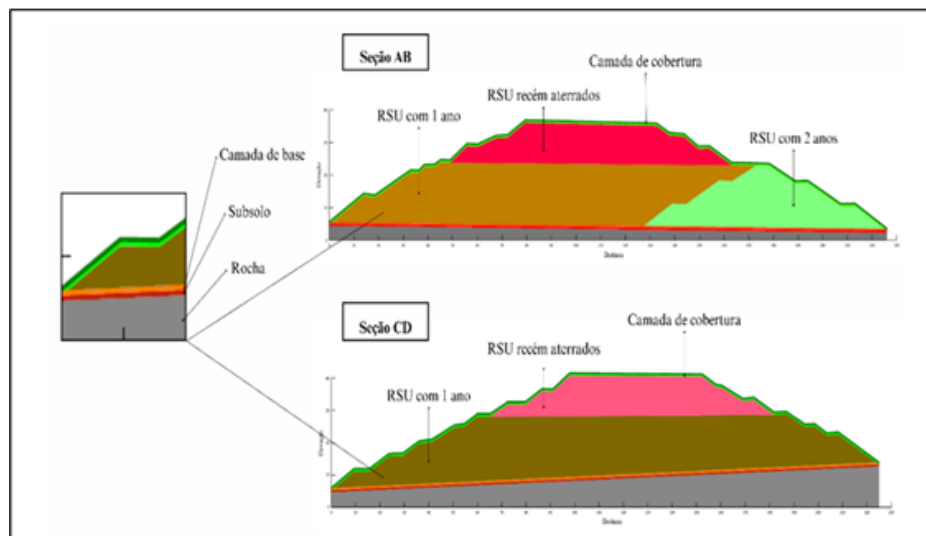
No contexto dos aterros sanitários, a análise de estabilidade torna-se ainda mais complexa devido à heterogeneidade dos resíduos, à presença de lixiviados e gases e à variabilidade dos parâmetros

geotécnicos (Jucá, 2021; Andrade, 2022; Remédio, 2014; Kölsch; Ziehmman, 2004).

Bezerra et al. (2025) destacam que resíduos recém-dispostos apresentam menor resistência ao cisalhamento, aumentando o risco de instabilidade, especialmente em condições de saturação.

A figura 4 a seguir, demonstra a Geometria e seções críticas do aterro sanitário.

Figura 4 - Geometria e seções críticas do aterro sanitário.



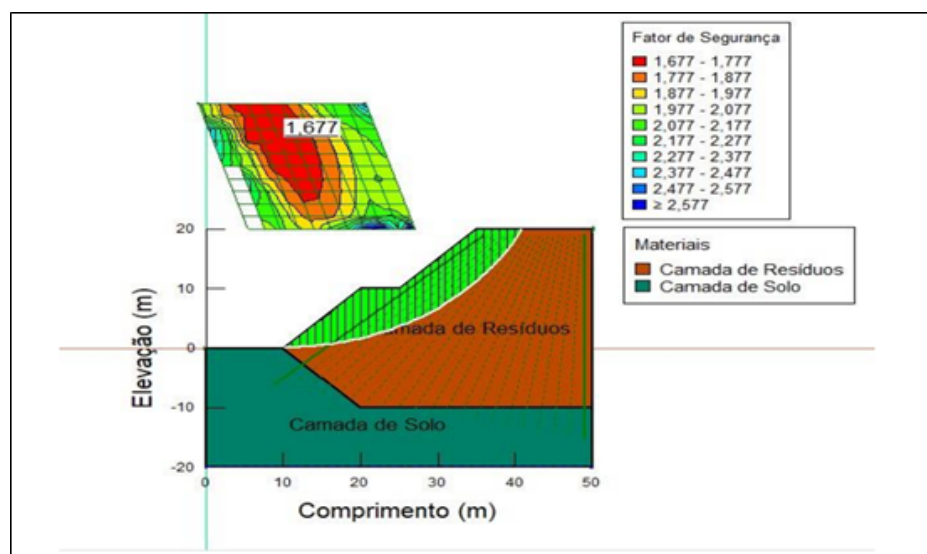
Fonte: Adaptado de Araújo Neto (2021), apud Bezerra et al. (2025)

Strauss (1998) evidenciou, por meio da análise de um aterro sanitário em Porto Alegre, que a variação do nível freático exerce influência direta e significativa na estabilidade dos taludes. O autor demonstrou que a elevação do nível de água no interior do maciço promove o aumento da poropressão, reduzindo as tensões efetivas e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento dos materiais. Em cenários de saturação elevada, o fator de segurança tende a diminuir de forma expressiva, podendo conduzir a condições críticas de instabilidade mesmo em estruturas previamente consideradas seguras.

Medeiros (2018), ao realizar retroanálises de casos reais de ruptura em aterros sanitários, identificou que a obstrução dos sistemas de drenagem e o consequente acúmulo de lixiviados constituem fatores determinantes para a perda de estabilidade. A pesquisa demonstrou que o aumento do nível de líquidos no interior do maciço não apenas eleva a poropressão, mas também altera o peso específico dos resíduos, intensificando as forças atuantes. Esse conjunto de fatores contribui para a redução do fator de segurança e favorece a formação de superfícies críticas de ruptura, especialmente em aterros com geometrias mais elevadas ou com controle operacional deficiente.

A figura 5 a seguir, demonstra a cunha de ruptura para o aterro sanitário de Bandeirantes.

Figura 5 - Perfil da cunha de ruptura para o aterro sanitário de Bandeirantes



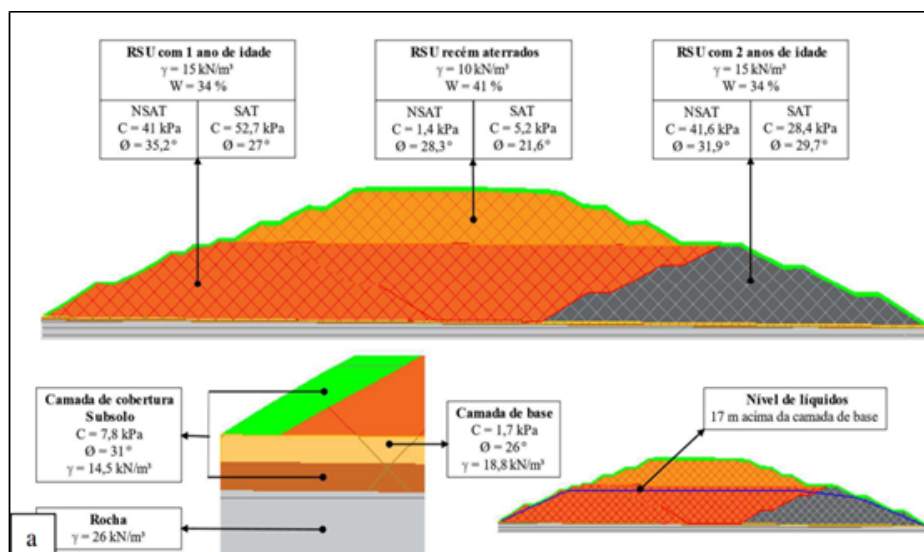
Fonte: Medeiros (2018).

Por fim, Araújo Neto (2021) aprofunda a análise ao destacar o papel da poropressão como um dos principais agentes de instabilidade em aterros sanitários. O autor demonstra que a presença de lixiviados e gases nos poros dos resíduos sólidos urbanos altera

significativamente o comportamento mecânico do material, reduzindo sua resistência ao cisalhamento. Além disso, ressalta que modelos clássicos da mecânica dos solos nem sempre são capazes de representar adequadamente essa complexidade, sendo necessária a adoção de modelos constitutivos específicos que considerem a heterogeneidade, a compressibilidade e a evolução temporal dos resíduos.

A figura 6 a seguir, demonstra os parâmetros utilizados na análise de estabilidade.

Figura 6 - Parâmetros utilizados na análise de estabilidade.



Fonte: Araújo Neto (2021)

De forma geral, a análise de estabilidade de taludes exige a integração entre métodos adequados, dados confiáveis e interpretação crítica, sendo fundamental para a prevenção de falhas em obras geotécnicas de alto risco ambiental e social. Nos estudos apresentados, observa-se que os métodos de estabilidade de taludes aplicados a barragens e aterros sanitários são, em essência, os mesmos, com destaque para os métodos de equilíbrio limite como Fellenius, Bishop, Janbu, Spencer e Morgenstern-Price. No

entanto, a principal diferença reside nas condições dos materiais e nas variáveis de controle.

Em barragens, os métodos são aplicados com maior previsibilidade, pois os materiais possuem parâmetros geotécnicos mais bem definidos e controlados, permitindo análises determinísticas e probabilísticas mais consistentes, como evidenciado por Santos Junior (2019), Sausen Netto (2019) e Giacon Junior (2018). Já em aterros sanitários, conforme Bezerra et al. (2025), Strauss (1998), Medeiros (2018) e Araújo Neto (2021), a heterogeneidade dos resíduos, a presença de lixiviados e a variabilidade da poropressão tornam as análises mais incertas, exigindo maior cautela na definição dos parâmetros e maior ênfase no monitoramento contínuo.

Assim, embora os métodos sejam os mesmos, sua aplicação em aterros sanitários demanda abordagens mais conservadoras e adaptativas em comparação às barragens.

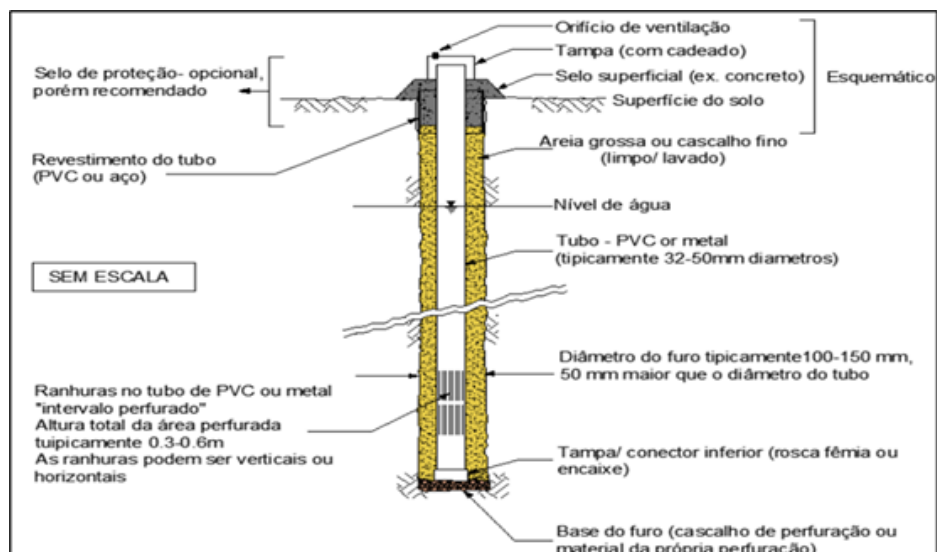
A instrumentação geotécnica constitui um elemento central no monitoramento e controle de obras que interagem com o solo. Segundo Boscov (2008) e Dunnicliff (1993), seu papel vai além da verificação do desempenho previsto em projeto, abrangendo também a antecipação de condições de risco e a prevenção de falhas estruturais. Entre os principais instrumentos destacam-se piezômetros, inclinômetros, extensômetros e marcos de recalque, cuja eficácia depende da correta seleção, instalação e interpretação dos dados (Silveira, 2006; Boscov, 2008). Em estruturas críticas, como barragens de rejeito e aterros sanitários, a instrumentação é indispensável para mitigar riscos, sendo inclusive exigida por normas brasileiras no contexto do Plano de Segurança de Barragens (Sowers,

1996; Vick, 1990). No caso dos aterros, Bouazza, Zornberg e Adam (2007) e Jucá (2021) destacam que o monitoramento permite controlar recalques, poropressões e fluxos de lixiviados e biogás, fatores diretamente associados à estabilidade dos taludes.

No que se refere aos instrumentos específicos, o medidor de nível d'água distingue-se dos piezômetros por medir apenas a lâmina livre em contato com a atmosfera. De acordo com ABNT NBR 11682:2009, esse dispositivo não capta a poropressão interna do solo, sendo utilizado principalmente para o monitoramento do lençol freático. Castro (2008) e Cerqueira (2017) descrevem que sua estrutura consiste em tubos perfurados instalados em furos de sondagem, permitindo a entrada de água e a leitura direta do nível. No entanto, Dunnicliff (1993), Silveira (2006) e Cerqueira (2017) ressaltam que a ausência de isolamento hidráulico compromete medições pontuais de pressão neutra, exigindo técnicas de selagem para maior precisão.

A figura 7 a seguir, demonstra o perfil construtivo de medidor de nível d'água.

Figura 7 - Perfil construtivo de medidor de nível d'água.



Fonte: Cerqueira (2017, apud Vale; Coffey, 2016)

Rizzo (2007) explica que a leitura desses dispositivos é realizada com o equipamento conhecido como “pio”, que identifica o nível d’água por sinal sonoro ao entrar em contato com o fluido.

A figura 8 a seguir, demonstra o medidor de nível d’água (pio).

Figura 8 - Equipamento medidor de nível d’água (Pio).



Fonte: Próprio autor (2025).

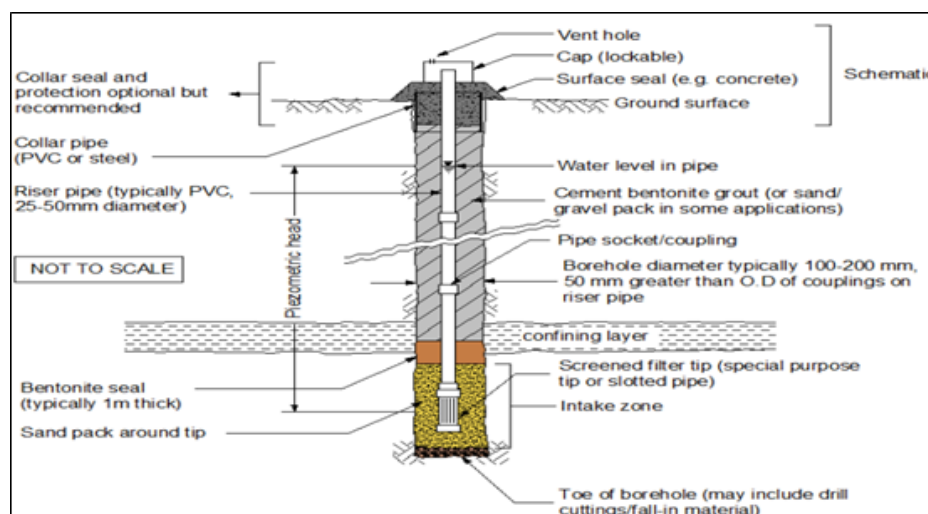
Os piezômetros são instrumentos fundamentais para a medição da poropressão e da carga hidráulica no interior dos maciços. Machado (2007) e Cerqueira (2017) destacam que esses dispositivos permitem compreender as condições de saturação e estabilidade, sendo

essenciais para análises geotécnicas. A interpretação dos dados envolve parâmetros como carga piezométrica, carga altimétrica, carga hidrostática e carga total, além da poropressão, que influencia diretamente a resistência ao cisalhamento. Diversos autores, como Machado (2007), Fonseca (2003), Castro (2008) e Cerqueira (2017), apontam a existência de diferentes tipos de piezômetros, incluindo os modelos Casagrande, elétricos e o tipo Vector.

O piezômetro do tipo Casagrande é amplamente utilizado para medições pontuais de pressão neutra. Segundo Sestrem (2012) e Cerqueira (2017), sua instalação em furos de sondagem, associada à adequada selagem hidráulica, garante a confiabilidade das leituras ao evitar interferências entre camadas.

A figura 9 a seguir, demonstra o perfil construtivo de um piezômetro tipo Casagrande.

Figura 9 - Perfil construtivo de um piezômetro tipo Casagrande.



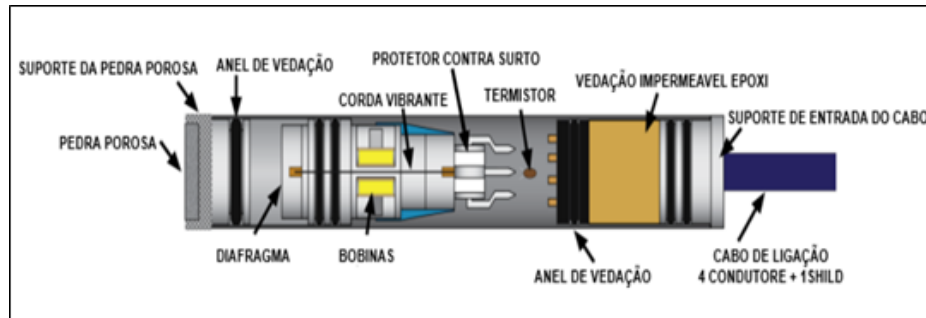
Fonte: Cerqueira (2017, apud Vale; Coffey, 2016).

Os piezômetros elétricos de corda vibrante destacam-se pela capacidade de leitura remota e contínua. Bastos (2023) ressalta que seu funcionamento baseia-se na variação da frequência de um fio

tensionado em resposta à pressão externa, permitindo medições precisas da pressão intersticial, especialmente em barragens.

A figura 10 a seguir, demonstra os componentes do piezômetro elétrico de corda vibrante.

Figura 10 - Componentes do piezômetro elétrico de corda vibrante

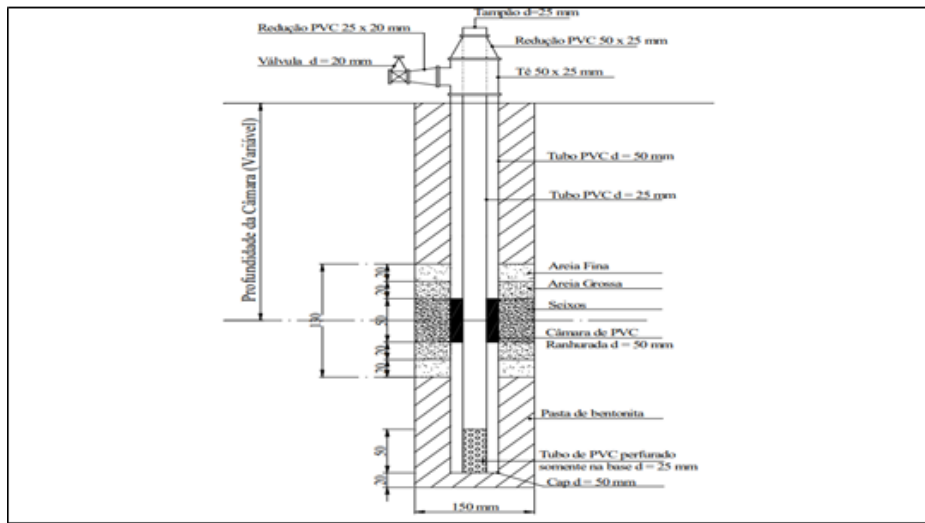


Fonte: Geokon (2014).

No contexto dos aterros sanitários, Antoniutti Neto et al. (1994) e Cepollina et al. (2004) destacam limitações dos piezômetros convencionais devido à presença simultânea de chorume e biogás. Como solução, o piezômetro do tipo Vector permite a medição separada dessas pressões por meio de tubos concêntricos, proporcionando maior confiabilidade nas leituras.

As figuras 11 e 12 a seguir, demonstram respectivamente o perfil construtivo de um piezômetro do tipo Vector e o manômetro utilizado para medição de pressão de gás.

Figura 11 - perfil construtivo de um piezômetro do tipo Vector



Fonte: Antoniutti Neto et al. (1994).

Figura 12 - Manômetro utilizado para medição de pressão de gás



Fonte: Próprio autor (2025)

Observa-se que barragens e aterros sanitários, apesar de suas diferenças construtivas e operacionais, compartilham o uso dos piezômetros como principal instrumento de monitoramento geotécnico. Em ambos os casos, esses dispositivos são essenciais para a medição da poropressão e para a compreensão das condições de saturação interna, variáveis diretamente relacionadas à estabilidade dos taludes (Machado, 2007; Cerqueira, 2017).

Nas barragens, os piezômetros são amplamente utilizados para o controle das pressões intersticiais ao longo do maciço, sendo

fundamentais para avaliar a segurança estrutural e atender às exigências normativas (Bastos, 2023). Já nos aterros sanitários, embora cumpram a mesma função básica, sua aplicação exige adaptações em função da presença simultânea de lixiviados e biogás, como evidenciado pelo uso de piezômetros do tipo Vector (Antoniutti Neto et al., 1994; Cepollina et al., 2004).

De forma geral, a instrumentação geotécnica representa um elemento indispensável para a engenharia moderna. Conforme Boscov (2008), sua aplicação permite o monitoramento contínuo, a identificação precoce de anomalias e a adoção de medidas preventivas, sendo fundamental para garantir a segurança e a estabilidade de estruturas geotécnicas de elevado risco ambiental e social.

Os acidentes geotécnicos em barragens e aterros sanitários resultam da interação entre fatores técnicos, operacionais e ambientais, com destaque para falhas de projeto, drenagem inadequada, ausência de monitoramento e influência de eventos climáticos extremos. Em ambos os casos, a elevação da poropressão e a redução da resistência ao cisalhamento configuram mecanismos centrais de instabilidade, sendo agravados pela falta de instrumentação e pela interpretação inadequada de dados (Morgado, 2022; Zucheratto, 2021; Guidicini; Sandroni; Mello, 2021). A literatura reforça que a prevenção depende da integração entre caracterização geotécnica, monitoramento contínuo e gestão eficiente.

No contexto das barragens, os acidentes históricos evidenciam a recorrência de falhas associadas a erosão interna, liquefação e deficiência de controle operacional (Dorta, 2023). Casos emblemáticos como Mariana (2015) e Brumadinho (2019) destacam

a magnitude dos impactos e a necessidade de aprimoramento regulatório (Reis et al., 2019; Cota; Magalhães Junior, 2024).

A Tabela 1 a seguir, evidencia os acidentes geotécnicos em barragens no Brasil.

Tabela 1 - Registros de acidentes geotécnicos em barragens no Brasil.

Ano	Barragem	Consequências principais	Justificativa técnica
2001	Barragem dos Macacos (MG)	5 mortos	Falha estrutural com vítimas fatais e impacto ambiental (GUIDICINI et al., 2021)
2003	Cataguases (MG)	Contaminação do Rio Paraíba do Sul	Grande impacto ambiental e repercussão normativa (REIS et al., 2019)
2004	Camará (PB)	5 mortos, 3 mil desabrigados	Ruptura total, motivou revisão de critérios de segurança (GUIDICINI et al., 2021)
2007	Miraí (MG)	4 mil desalojados	Falha operacional e drenagem insuficiente (MORGADO, 2022)
2014	Itabirito (MG)	3 mortos	Instabilidade geotécnica com vítimas fatais (DORTA, 2023)
2015	Fundão (Mariana, MG)	19 mortos, desastre ambiental	Maior impacto ambiental da história do Brasil, referência mundial (REIS et al., 2019)

2019	Brumadinho, (MG)	272 mortos, maior desastre industrial do Brasil	Evento crítico que motivou mudanças regulatórias e estudos internacionais (COTA; MAGALHÃES JUNIOR, 2021)
------	---------------------	--	---

Fonte: Adaptado de Guidicini; Sandroni; Mello (2021); Reis et al. (2019); Morgado (2022); Dorta (2023); Cota; Magalhães Junior (2024).

No caso da barragem de Fundão (2015), estudos indicam que a ruptura foi causada por liquefação estática associada à presença de rejeitos saturados e alterações geométricas que elevaram as pressões internas (Morgenstern et al., 2016). Nassar De Souza et al. (2022) complementam que falhas de gestão e interpretação de dados piezométricos contribuíram para a evolução da instabilidade.

A figura 13 a seguir, demonstra a barragem de Fundão após o rompimento.

Figura 13 - Barragem de Fundão após o rompimento.



Fonte: IBAMA (2015)

Em aterros sanitários, os acidentes estão fortemente relacionados à heterogeneidade dos resíduos, à presença de lixiviados e à

deficiência dos sistemas de drenagem. A literatura aponta que a ausência de monitoramento e de registros técnicos historicamente dificultou a compreensão desses eventos (Blight, 2008).

As tabelas 2 e 3, evidenciam os acidentes geotécnicos em aterros sanitários no Brasil e os acidentes geotécnicos em aterros sanitários em outros países.

Tabela 2 - Acidentes geotécnicos em aterros sanitários no Brasil

Ano	Aterro
1991	Bandeirantes (SP)
1992	Itapecerica da Serra (SP)
1995	Mauá (SP)
2000	Itaquaquetuba (SP)
2004	Juiz de Fora (MG)
2004	Guarujá (SP)
2006	Itapecerica da Serra (SP)
2007	Sítio São João (SP)
2011	Itaquaquetuba (SP)

Fonte: Adaptado de Benvenuto (2007).

Tabela 3 - Acidentes geotécnicos em aterros sanitários pelo mundo

Ano	Aterro / Localização
1993	Istambul (Turquia)

1996	La Coruña (Espanha)
1996	Rumpke (EUA)
1997	Dona Juana (Colômbia)
1997	Sarajevo (Iugoslávia)
1997	Durban (África do Sul)
2000	Payatas (Filipinas)
2001	Navarro (Colômbia)
2005	Leuwigajah (Indonésia)

Fonte: Fonte: Adaptado de Blight (2008) e Kölsch e Ziehmann (2004).

O caso do Aterro Bandeirantes (1991) exemplifica esses mecanismos, tendo a ruptura sido associada à elevação da poropressão, à saturação do maciço e à heterogeneidade dos resíduos, fatores que reduziram significativamente o fator de segurança dos taludes (Benvenuto; Cunha, 1991; Malavoglia, 2016). Estudos complementares indicam ainda a influência de planos de ruptura associados ao solo de fundação e à drenagem ineficiente (Kaimoto; Cepollina, 1996).

A figura 14 a seguir, demonstra o aterro sanitário de Bandeirantes após o rompimento em 1991.

Figura 14 - aterro sanitário de Bandeirantes após o rompimento em 1991.



Fonte: IPT (1991).

Os acidentes em barragens e aterros sanitários ocorrem de forma semelhante por resultarem de processos progressivos de instabilidade. Em ambos, o aumento da poropressão e a saturação reduzem a resistência ao cisalhamento, levando à queda do fator de segurança (Morgado, 2022; Peng et al., 2016).

Além disso, a heterogeneidade dos materiais e a influência de chuvas intensas atuam como fatores agravantes e gatilhos de ruptura (Zucheratto, 2021; Guidicini; Sandroni; Mello, 2021).

Por fim, a deficiência no monitoramento é um ponto comum: a falta de instrumentação ou a má interpretação dos dados permite que a instabilidade evolua de forma silenciosa até o colapso.

De forma geral, os acidentes geotécnicos nessas estruturas evidenciam que a estabilidade não depende apenas do dimensionamento inicial, mas da integração entre projeto, operação, monitoramento e interpretação contínua dos dados, sendo a instrumentação geotécnica elemento central para a mitigação de riscos.

3. METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza qualitativa, com abordagem descritiva e analítica, fundamentada em revisão bibliográfica sistemática e análise técnica comparativa. Essa abordagem foi adotada em consonância com os objetivos do trabalho, que consistem em analisar comparativamente o comportamento geotécnico de barragens e aterros sanitários, com ênfase na estabilidade de taludes, na instrumentação geotécnica e nos mecanismos associados a acidentes estruturais.

Inicialmente, foi conduzida uma revisão sistemática da literatura, contemplando obras clássicas da mecânica dos solos e da engenharia geotécnica, bem como artigos científicos, dissertações, teses e normas técnicas nacionais e internacionais. As fontes foram selecionadas com base em critérios de relevância temática, consistência metodológica, reconhecimento acadêmico dos autores e aderência aos objetivos propostos. Foram priorizados trabalhos que abordam o comportamento hidráulico dos maciços, a estabilidade de taludes, a geração e dissipação de poropressões, bem como o uso de instrumentação geotécnica aplicada ao monitoramento de estruturas de grande porte.

A etapa de levantamento bibliográfico envolveu a análise crítica de publicações indexadas em bases de dados científicas e documentos técnicos, com o objetivo de consolidar o estado da arte e fornecer embasamento teórico para as comparações realizadas. Sempre que possível, foram utilizadas fontes primárias e estudos de caso, de modo a assegurar maior robustez às análises desenvolvidas.

Na sequência, procedeu-se à análise comparativa entre barragens de rejeitos e aterros sanitários, estruturada a partir de três eixos diretamente relacionados aos objetivos específicos do estudo: a

estabilidade de taludes, a instrumentação geotécnica e os acidentes geotécnicos comuns a ambas as estruturas. No eixo da estabilidade, foram analisados os mecanismos de ruptura, a influência das pressões neutras e os métodos de avaliação empregados. No eixo da instrumentação, a análise concentrou-se nos dispositivos utilizados, com ênfase nos piezômetros, e em sua aplicação no monitoramento das condições internas dos maciços. Já no eixo dos acidentes, foram avaliadas as causas recorrentes, os fatores desencadeadores e os padrões de comportamento associados às falhas estruturais.

Adicionalmente, foram incorporadas discussões técnicas acerca da instrumentação geotécnica, com ênfase no uso de piezômetros como principal ferramenta para o monitoramento de pressões intersticiais, em alinhamento com o objetivo de compreender seu papel na prevenção de falhas. A análise considerou tanto os princípios de funcionamento quanto as limitações operacionais desses instrumentos, destacando sua importância na detecção precoce de anomalias e no acompanhamento do comportamento hidráulico dos maciços.

Como forma de reforçar a aderência aos objetivos do trabalho, foram analisados estudos de caso documentados na literatura, especialmente aqueles relacionados a acidentes geotécnicos em barragens e aterros sanitários. Esses casos permitiram validar, sob uma perspectiva empírica, os conceitos discutidos, estabelecendo uma conexão direta entre teoria e prática.

No que se refere às limitações da metodologia, destaca-se que o estudo se baseia predominantemente em dados secundários, provenientes da literatura técnica e científica, não envolvendo coleta direta de dados de campo. Dessa forma, os resultados apresentados

dependem da qualidade e abrangência das fontes consultadas. Além disso, a análise comparativa possui caráter qualitativo, o que implica certo grau de subjetividade, ainda que fundamentada em referências consolidadas. Por fim, ressalta-se que as conclusões obtidas não substituem análises específicas de projeto, sendo voltadas à compreensão teórica e técnica dos fenômenos estudados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise comparativa desenvolvida neste estudo evidencia que, embora barragens de terra e aterros sanitários possuam finalidades distintas, ambas as estruturas compartilham fundamentos geotécnicos comuns que governam seu comportamento. Os resultados obtidos a partir da revisão bibliográfica e da análise técnica permitem identificar convergências significativas nos aspectos relacionados à estabilidade de taludes, à instrumentação geotécnica e à ocorrência de acidentes, ao mesmo tempo em que revelam particularidades associadas à natureza dos materiais e às condições operacionais de cada sistema.

No que se refere à estabilidade de taludes, observa-se que os métodos clássicos de análise, como os métodos de equilíbrio limite desenvolvidos por Fellenius, Bishop, Janbu, Morgenstern e Price e Spencer, são amplamente aplicados tanto em barragens quanto em aterros sanitários. Essa similaridade metodológica demonstra que os princípios da mecânica dos solos são igualmente válidos para ambas as estruturas. No entanto, as diferenças tornam-se evidentes quando se analisam as características dos materiais constituintes. Enquanto as barragens são, em geral, construídas com materiais selecionados e relativamente homogêneos, os aterros sanitários são compostos por resíduos sólidos urbanos altamente heterogêneos, com

propriedades variáveis no tempo e no espaço. Essa heterogeneidade implica maior incerteza na definição dos parâmetros geotécnicos, o que pode comprometer a precisão das análises e exigir abordagens mais conservadoras ou complementadas por métodos probabilísticos. Além disso, em ambos os casos, a poropressão se apresenta como um dos fatores mais críticos para a estabilidade, influenciando diretamente a resistência ao cisalhamento e, conseqüentemente, o fator de segurança dos taludes.

No campo da instrumentação geotécnica, os resultados indicam que o uso de piezômetros constitui um elemento central no monitoramento de barragens e aterros sanitários. Em ambas as estruturas, esses instrumentos desempenham papel fundamental na medição das pressões intersticiais, permitindo a avaliação das condições internas do maciço e a identificação de situações de risco. Em barragens, a instrumentação está fortemente associada à segurança estrutural e ao atendimento de requisitos normativos, sendo parte integrante dos planos de segurança. Já nos aterros sanitários, além da estabilidade geotécnica, a instrumentação também se relaciona ao controle ambiental, especialmente no monitoramento de lixiviados e biogás. Nesse contexto, observa-se a adaptação de soluções instrumentais, como o uso de piezômetros específicos para ambientes com presença simultânea de líquidos e gases, evidenciando a necessidade de adequação dos sistemas de monitoramento às condições particulares de cada estrutura. Ainda assim, a convergência reside na função essencial da instrumentação: fornecer dados confiáveis para subsidiar a tomada de decisão e prevenir falhas.

No que diz respeito aos acidentes geotécnicos, a análise dos casos apresentados na literatura revela que os mecanismos de ruptura em

barragens e aterros sanitários apresentam forte similaridade. Em ambos os casos, os eventos de instabilidade estão frequentemente associados ao aumento da poropressão, à saturação do maciço, à deficiência dos sistemas de drenagem e à ausência ou inadequação do monitoramento. Esses fatores atuam de forma combinada, promovendo a redução da resistência ao cisalhamento e levando à perda de estabilidade dos taludes. A diferença mais marcante entre as estruturas reside na escala e na velocidade dos eventos. Em barragens, especialmente de rejeitos, as rupturas tendem a ser mais abruptas e com consequências catastróficas imediatas, enquanto em aterros sanitários os processos de instabilidade podem se desenvolver de forma mais gradual, embora igualmente críticos do ponto de vista ambiental e operacional. Ainda assim, os estudos de caso analisados demonstram que, em ambos os contextos, sinais precursoros de falha, como variações anômalas de poropressão e deslocamentos, estavam presentes, mas nem sempre foram devidamente interpretados.

De forma integrada, os resultados deste estudo indicam que barragens e aterros sanitários, apesar de suas diferenças funcionais e construtivas, respondem a mecanismos geotécnicos semelhantes, especialmente no que se refere à interação entre fluxo de fluidos, geração de pressões internas e resistência dos materiais. Essa constatação reforça a ideia de que práticas consolidadas na engenharia de barragens, como o uso sistemático de instrumentação, a análise criteriosa da poropressão e a adoção de métodos avançados de estabilidade, podem e devem ser aplicadas ao gerenciamento de aterros sanitários.

Assim, a principal contribuição desta análise reside na evidência de que a segurança dessas estruturas depende menos de sua

finalidade e mais da qualidade dos estudos geotécnicos, da eficiência dos sistemas de monitoramento e da capacidade de interpretação dos dados obtidos. A integração entre esses elementos constitui o fator determinante para a prevenção de falhas e para a garantia da estabilidade a longo prazo em obras geotécnicas de grande relevância ambiental e social.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo permitiu evidenciar que, embora barragens de terra e aterros sanitários possuam finalidades distintas, ambas as estruturas compartilham fundamentos geotécnicos essenciais que condicionam seu comportamento ao longo do tempo. A análise comparativa demonstrou que os princípios da mecânica dos solos, especialmente aqueles relacionados à estabilidade de taludes, à geração e dissipação de pressões intersticiais e ao fluxo de fluidos no interior do maciço, são comuns a ambos os sistemas.

No que se refere à estabilidade, verificou-se que os métodos clássicos de análise são amplamente aplicáveis tanto em barragens quanto em aterros sanitários, sendo a principal diferença associada à natureza dos materiais. A maior heterogeneidade dos resíduos sólidos urbanos impõe desafios adicionais à modelagem e à definição de parâmetros geotécnicos, exigindo abordagens mais cautelosas e, em muitos casos, complementadas por análises probabilísticas.

A instrumentação geotécnica mostrou-se elemento central para a compreensão e o controle do comportamento dessas estruturas. O uso de piezômetros, em particular, destaca-se como ferramenta indispensável para o monitoramento das pressões intersticiais,

permitindo a identificação precoce de condições de risco. A análise evidenciou que, tanto em barragens quanto em aterros sanitários, a ausência ou a interpretação inadequada dos dados de instrumentação pode comprometer significativamente a segurança estrutural.

No que tange aos acidentes geotécnicos, observou-se que os mecanismos de ruptura apresentam forte similaridade entre as duas estruturas, estando frequentemente associados ao aumento da poropressão, à saturação do maciço e à deficiência dos sistemas de drenagem. Esses fatores, quando não devidamente monitorados e controlados, podem levar à redução da resistência ao cisalhamento e à consequente instabilidade dos taludes.

Nesse contexto, ressalta-se a importância da evolução dos sistemas de monitoramento geotécnico, incluindo a incorporação de soluções automatizadas. A automação, ainda que não substitua a análise técnica especializada, contribui para o aumento da confiabilidade das leituras, a redução de falhas humanas e a maior continuidade na aquisição de dados, aspectos que favorecem a detecção mais ágil de comportamentos anômalos em ambas as estruturas.

Dessa forma, conclui-se que a segurança de barragens e aterros sanitários está diretamente relacionada à integração entre projeto adequado, monitoramento contínuo e interpretação crítica dos dados geotécnicos. As práticas consolidadas na engenharia de barragens, especialmente no que se refere à instrumentação e ao controle de riscos, apresentam elevado potencial de aplicação no contexto dos aterros sanitários, contribuindo para o aprimoramento da gestão dessas estruturas.

Por fim, ressalta-se que a adoção de abordagens integradas, que considerem simultaneamente aspectos técnicos, operacionais e ambientais, é fundamental para a mitigação de riscos e para a consolidação de uma engenharia geotécnica moderna, segura e orientada à prevenção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENDT, Adriana. **Movimentos de massa gravitacionais: proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão – SP.** 2005. 334 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

ANDRADE, Rodrigo da Costa. **Impacto ambiental de lixões e aterros sanitários em recursos hídricos.** 2022. 96 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Naturais do Cerrado) – Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2022.

ANTONIUTTI NETO, L.; VAL, E. C.; MELLO, L. G. F. S. Um novo piezômetro para aterros sanitários. In: SEMINÁRIO SOBRE A GEOTECNIA DE ATERROS PARA A DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS, 1994. Anais... 1994.

ARAÚJO NETO, C. L. de. **Modelagem da resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos para análises da estabilidade de taludes de aterros sanitários.** 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682:2009: **estabilidade de taludes.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009. Disponível em:

<https://www.abntcatalogo.com.br>. Acesso em: 8 jul. 2025.

BASTOS, Wellerson da Silva. **Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados universal para monitoramento de barragens, com teste de equalização de piezômetros, utilizando internet das coisas**. 2023. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.

BEZERRA, Ana Letícia Ramos et al. Avaliação da estabilidade de taludes de aterro sanitário: uma análise bidimensional e de sensibilidade do fator de segurança. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 11, n. 1, p. 810–824, 2025.

BISHOP, Alan W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. **Géotechnique**, v. 5, n. 1, p. 7–17, 1955.

BOSCOV, Maria Eugênia Gimenez. **Geotecnia ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

BOTELHO, Marcos Ribeiro et al. Rompimento das barragens de Fundão e da Mina do Córrego do Feijão em Minas Gerais, Brasil: decisões organizacionais não tomadas e lições não aprendidas. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, v. 46, e16, 2021.

BOUAZZA, A.; ZORNBERG, J. G.; ADAM, D. Geosynthetics in waste containment facilities: recent advances. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GEOSYNTHETICS, 2007. Anais... 2007. p. 217–236.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 21 set. 2010.

CASTRO, L. V. P. **Avaliação do comportamento do nível d'água em barragem de contenção de rejeito alteada a montante.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

CERQUEIRA, Hélio M. L. de. **Critérios de projeto para instrumentação piezométrica de diversas estruturas geotécnicas em mineração.** 2017. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

CHENG, Yong Chun; JIANG, Ping. Sensitivity analysis of factors affecting slope stability. **Applied Mechanics and Materials**, v. 170–173, p. 1072–1075, 2012.

CHRISTIAN, John T.; LADD, Charles C.; BAECHER, Gregory B. Reliability applied to slope stability analysis. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 120, n. 12, p. 2180–2207, 1994.

DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica.** São Paulo: Cengage Learning, 2010.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G. **Soil strength and slope stability.** Hoboken: Wiley, 2005.

DUNNICLIFF, J. **Geotechnical instrumentation for monitoring field performance.** New York: John Wiley & Sons, 1993.

FELLENIUS, W. Calculation of the stability of earth dams. **Transactions of the International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering**, v. 3, p. 13–18, 1927.

FETTER, C. W. **Applied hydrogeology**. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

FONSECA, A. R. **Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica**. 2003. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

GOKON INC. **Instruction manual: model 4500 series vibrating wire piezometer**. 2014.

GIACON JUNIOR, Admir José. **Análise probabilística da estabilidade de taludes via teoria da confiabilidade**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2018.

GIORGINI, M. G. **Avaliação do desempenho geotécnico e ambiental de aterros sanitários**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

GUIDICINI, Guido; NIEBLE, Carlos M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Edgard Blücher, 1984.

JANBU, N. **Stability analysis of slopes with dimensionless parameters**. Cambridge: Harvard University, 1954.

JUCÁ, José Fernando Tomé. **Brasília municipal solid waste landfill: a case study on flow slides and monitoring**. Recife: UFPE, 2021.

KAIMOTO, L. S. A.; CEPOLLINA, M. Considerações sobre condicionantes geotécnicos de aterros sanitários. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DA QUALIDADE AMBIENTAL, 1996, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre, 1996. p. 51–54.

KOERNER, R. M.; SOONG, T. Y. Stability assessment of ten large landfill failures. In: **Advances in Transportation and Geoenvironmental Systems**. ASCE, 2000.

KÖLSCH, F.; ZIEHMANN, G. Landfill stability: risks and challenges. **Waste Management World**, p. 55–60, 2004.

LAMBE, T. William; WHITMAN, Robert V. **Soil mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1969.

MACHADO, W. G. F. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MEDEIROS, Rafaella de Moura. **Avaliação de estabilidade de taludes de aterros sanitários**. 2018. TCC – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2018.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. The analysis of the stability of general slip surfaces. **Géotechnique**, v. 15, n. 1, p. 79–93, 1965.

NETTO, Arthur Sausen. **Análise de estabilidade de uma barragem de terra**. 2019. TCC – UTFPR, Guarapuava, 2019.

RCIÚNCULA, Rogério de Jesus. **Hidrogeofísica e resíduos sólidos urbanos**. 2020. Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020.

REMÉDIO, F. H. **Análise de estabilidade de taludes de aterro de resíduos urbanos**. 2014. Dissertação – UNESP, Rio Claro, 2014.

- RIZZO, S. M. **Monitoramento das escavações de uma área de rejeito de bauxita**. 2007. Dissertação – UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.
- ROWE, R. K. Long-term performance of contaminant barrier systems. **Géotechnique**, v. 55, n. 9, p. 631–678, 2005.
- SALTELLI, A. et al. Why so many published sensitivity analyses are false. **arXiv preprint**, 2017.
- SANTOS JUNIOR, A. E. **Análise probabilística da estabilidade de taludes em barragens de terra no estado do Ceará**. 2019. Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2019.
- SARAVALLE, C. B. **Correntes naturais em obras de engenharia civil (barragens)**. 1973. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1973.
- SCHNAID, F. et al. Guidelines on minimum factors of safety for slope stability. **Soils and Rocks**, v. 43, n. 3, p. 351–368, 2020.
- SCHULER, Alexandre Roberto. **Análise do comportamento de um aterro municipal**. 2010. Dissertação – UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.
- SESTREM, L. P. **Plano de instrumentação geotécnica de encosta litorânea**. 2012. Dissertação – UFPR, Curitiba, 2012.
- SILVA, Leandro Azevedo. **Consolidação de rejeitos finos em barragens de mineração**. 2014. Monografia – UFMG.
- SILVA, Paulo Henrique Alfenas da. **Simulação numérica das poropressões**. 2020. Dissertação – UFMG, Belo Horizonte, 2020.

SILVA, Tiago Barbosa da. **Análise de fluxo, estabilidade e tensão-deformação de barragem**. 2020. Dissertação – UFPE, Caruaru, 2020.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e segurança de barragens**. Porto Alegre: UFRGS, 2006.

SOWERS, G. B. **Building on sinkholes**. New York: ASCE Press, 1996.

SPENCER, E. Stability analysis of slopes. **Géotechnique**, v. 17, n. 1, p. 11–26, 1967.

STRAUSS, M. **Análise de estabilidade de um aterro sanitário**. 1998. Dissertação – UFRGS, Porto Alegre, 1998.

TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph B.; MESRI, Gholamreza. **Soil mechanics in engineering practice**. 3. ed. New York: Wiley, 1996.

VIANNA, L. F. V. **Metodologias de análise de risco aplicadas em barragens**. 2015. Dissertação – UFMG, 2015.

VICK, Steven G. **Planning, design, and analysis of tailings dams**. Vancouver: BiTech Publishers, 1990.

WILLIAMS, D. J. Lessons from tailings dam failures. **Minerals**, v. 11, n. 8, p. 853, 2021.

XIA, C.-A. et al. Global sensitivity analysis of slope stability. **Water**, v. 17, n. 2, 2025.

ZIEHER, T. et al. Sensitivity analysis of slope stability model. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 17, n. 6, p. 971–988, 2017.

ZEIN, A. K.; KARIM, W. A. Stability of slopes on clays. **Geomate Journal**, v. 13, n. 38, p. 157–164, 2017.

¹ Engenheiro Civil, Mestrando pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental - PEBGA, Universidade Federal do Pará. E-mail: bryan__jackson@hotmail.com.

² Engenheira Civil, Mestranda pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Infraestruturas e Desenvolvimento Energético – PPGINDE, Universidade federal do Pará. E-mail: aderian94@live.com

³ Docente, Doutor em Estruturas, no Instituto de Tecnologia – ITEC da Universidade Federal do Pará. E-mail: mrt@ufpa.br