

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

INFLUÊNCIA DE PRECIPITAÇÃO EXTREMA PONTUAL NA ESTABILIDADE DE
TALUDES DE ATERRO INDUSTRIAL

SABRINA ROBERTA DE FARIA

JUIZ DE FORA

2026

INFLUÊNCIA DE PRECIPITAÇÃO EXTREMA PONTUAL NA ESTABILIDADE DE TALUDES DE ATERRO INDUSTRIAL

SABRINA ROBERTA DE FARIA

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

Área de Conhecimento: Geotecnia Ambiental

Orientador: Prof.^a Dr.^a Júlia Righi de Almeida

Coorientador(a): Eng. Jonathan do Amaral Braz,
MSc.

Juiz de Fora

Faculdade de Engenharia da UFJF

2026

INFLUÊNCIA DE PRECIPITAÇÃO EXTREMA PONTUAL NA ESTABILIDADE DE TALUDES DE ATERRO INDUSTRIAL

SABRINA ROBERTA DE FARIA

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

Aprovado em:

Por:

Documento assinado digitalmente
 **JULIA RIGHI DE ALMEIDA**
Data: 22/07/2026 16:37:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Júlia Righi de Almeida, D.Sc.

Universidade Federal de Juiz de Fora/Departamento de Transportes e Geotecnia

Documento assinado digitalmente
 **JONATHAN DO AMARAL BRAZ**
Data: 22/07/2026 17:05:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Jonathan do Amaral Braz, M.Sc.

Universidade Federal de Juiz de Fora/Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional (Doutorando)

Documento assinado digitalmente
 **TATIANA TAVARES RODRIGUEZ**
Data: 24/07/2026 12:00:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Tatiana Tavares Rodriguez, D.Sc.

Universidade Federal de Juiz de Fora/Departamento de Transportes e Geotecnia

Documento assinado digitalmente
 **CATIA DE PAULA MARTINS**
Data: 25/07/2026 19:52:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Cátia de Paula Martins, D.Sc.

Universidade Federal de Juiz de Fora/Departamento de Transportes e Geotecnia

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me abençoado desde a aprovação no vestibular e ter me sustentado todos esses anos de graduação.

Aos meus pais, Adélia e Aloísio, por serem minha base e motivação. À minha irmã, Silvana, por ser meu porto seguro e ter me dado o melhor presente desse mundo, minha sobrinha Sofia.

À tia Mari, por ser uma segunda mãe para mim e se preocupar comigo sempre.

Ao Nicodemos, por toda parceria, incentivo, compreensão e exemplo como profissional.

Aos amigos que a graduação me deu, que me incentivaram e estiveram comigo em todo o processo, nos momentos bons e ruins.

Aos funcionários terceirizados, pelo carinho, cuidado, conversas e cafés compartilhados.

Ao Programa de Educação Tutorial (PET) Civil da UFJF, por ser meu primeiro projeto na graduação, ter sido minha casa por quase dois anos, me auxiliado no desenvolvimento pessoal e profissional e também, ter colocado pessoas incríveis na minha vida.

À minha orientadora, Júlia Righi, por ser um exemplo de mulher e profissional desde o início da graduação, quando a conheci como tutora do PET, tive oportunidade de ser sua monitora, fazer suas disciplinas eletivas, onde me descobri na área da Geotecnia Ambiental.

Ao meu co-orientador, Jonathan Braz, pelas dicas, conversas, desabafos, auxílios, não só durante a elaboração desse TCC, mas também na iniciação científica e em outros momentos no laboratório.

À professora Tatiana Rodriguez, que tive o prazer de ser monitora e fazer uma Iniciação Científica, obrigada pelo carinho e pelas oportunidades.

À UFJF, pela oportunidade de ter um ensino gratuito e de qualidade e também, pelos auxílios que me ajudaram a me manter em Juiz de Fora.

A todas as pessoas que me ajudaram a vencer esses anos, direta ou indiretamente, meu muito obrigada.

RESUMO

O aumento da geração de resíduos sólidos, impulsionado pelo crescimento populacional, pela obsolescência programada e pela intensificação das atividades industriais, tem ampliado a demanda por sistemas de disposição final ambientalmente adequados. Nesse contexto, os aterros industriais desempenham papel fundamental na destinação de resíduos perigosos, exigindo condições rigorosas de segurança ambiental e geotécnica. Paralelamente, o aumento da frequência e da intensidade de eventos climáticos extremos tem despertado preocupações quanto aos efeitos da infiltração de água sobre a estabilidade dessas estruturas. Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência de precipitação extrema do dia mais chuvoso de fevereiro de 2026 na estabilidade de taludes de um aterro industrial localizado em Juiz de Fora, Minas Gerais. Para isso, foi realizada uma modelagem numérica do fluxo de água utilizando o software SEEP/W, seguida de análises de estabilidade por meio do SLOPE/W, ambos pertencentes ao pacote GeoStudio 2012. A modelagem de fluxo foi realizada em regime transiente, pois considera a variação do tempo, e a chuva utilizada foi a maior precipitação diária registrada no município em fevereiro de 2026, correspondente a 138,6 mm em 24 horas. Os resultados indicaram que a infiltração da água da chuva promoveu redução das poropressões negativas nas camadas superficiais do maciço, evidenciando a diminuição da sucção matricial. A variação de poropressões aconteceu principalmente nas camadas mais superficiais do aterro. Como consequência, os fatores de segurança apresentaram apenas pequenas reduções para as três análises realizadas: a Análise 1 variou de 6,103 para 6,049 (0,88%), a Análise 2, de 2,834 para 2,832 (0,07%) e a Análise 3, de 1,837 para 1,825 (0,65%). Apesar dessas variações, todos os fatores de segurança mantiveram-se superiores ao valor mínimo de 1,50 recomendado pela ABNT NBR 11682:2009. Conclui-se que, para as condições geométricas, geotécnicas e hidráulicas adotadas na modelagem, a precipitação extrema influenciou negativamente a estabilidade do aterro industrial, porém não comprometeu a estabilidade global. Os resultados reforçam a importância da utilização de análises acopladas de fluxo e estabilidade na avaliação do comportamento de aterros submetidos a eventos pluviométricos extremos, contribuindo para o aperfeiçoamento de projetos, sistemas de drenagem e estratégias de monitoramento geotécnico.

Palavras-chave: Aterro industrial; Precipitação extrema; Estabilidade de taludes.

ABSTRACT

The increase in solid waste generation, driven by population growth, planned obsolescence, and the intensification of industrial activities, has amplified the demand for environmentally adequate final disposal systems. In this context, industrial landfills play a fundamental role in the disposal of hazardous waste, requiring rigorous environmental and geotechnical safety conditions. At the same time, the increasing frequency and intensity of extreme climatic events have raised concerns regarding the effects of water infiltration on the stability of these structures. Given this scenario, the objective of this study was to evaluate the influence of the extreme rainfall recorded on the rainiest day of February 2026 on the slope stability of an industrial landfill located in Juiz de Fora, Minas Gerais. To this end, a numerical water flow modeling analysis was performed using the SEEP/W software, followed by stability analyses using SLOPE/W, both part of the GeoStudio 2012 package. The flow modeling was carried out under transient conditions, since it accounts for time variation, and the rainfall event used corresponded to the highest daily precipitation recorded in the municipality in February 2026, equivalent to 138.6 mm in 24 hours. The results indicated that rainwater infiltration promoted a reduction in negative pore-water pressures within the superficial layers of the embankment, evidencing a decrease in matric suction. Pore-pressure variation occurred mainly in the shallower layers of the landfill. As a consequence, the factors of safety showed only slight reductions across the three analyses performed: Analysis 1 decreased from 6.103 to 6.049 (0.88%), Analysis 2 from 2.834 to 2.832 (0.07%), and Analysis 3 from 1.837 to 1.825 (0.65%). Despite these variations, all safety factors remained above the minimum value of 1.50 recommended by ABNT NBR 11682:2009. It is concluded that, for the geometric, geotechnical, and hydraulic conditions adopted in the modeling, the extreme rainfall event negatively affected the stability of the industrial landfill, although it did not compromise its overall stability. These results reinforce the importance of coupled flow-stability analyses in assessing the behavior of landfills subjected to extreme rainfall events, contributing to the improvement of design practices, drainage systems, and geotechnical monitoring strategies.

Keywords: Industrial landfill; Extreme rainfall; Slope stability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Aterro Sanitário de Brasília, Distrito Federal	15
Figura 2 – Drenos de chorume interligados ao dreno de gás	16
Figura 3 – Aproximação da envoltória de Mohr-Coulomb por uma reta.....	19
Figura 4 – Mapa do acumulado de precipitação (mm) em fevereiro de 2026.....	23
Figura 5 – Fases de Operação do aterro “A”	25
Figura 6 – Drenos de Gás e Percolado instalados nas Fases 1 e 2	26
Figura 7 – Seções 1, 2, 3 e 4 traçados pela equipe de topografia do Aterro “A”	26
Figura 8 – Curva Característica do resíduo	29
Figura 9 – Curva de condutividade hidráulica do resíduo.....	29
Figura 10 – Modelagem final do aterro “A”.....	30
Figura 11 – Análises de estabilidade de taludes	31
Figura 12 – Poropressões iniciais antes da chuva de $1,60 \times 10^{-6}$ m/s	32
Figura 13 – Poropressões após uma chuva de $1,60 \times 10^{-6}$ m/s com duração de 24 horas.....	32
Figura 14 – Poropressões nos pontos de Pressão 0 na parte direita do aterro	33
Figura 15 – Poropressões nos pontos de Pressão 0 na parte central do aterro	33
Figura 16 – Poropressões da Análise 1 para o tempo 0 hora.....	34
Figura 17 – Poropressões da Análise 1 após uma chuva de $1,60 \times 10^{-6}$ m/s com duração de 24 horas	34
Figura 18 – Poropressões da Análise 2 para o tempo 0 hora.....	35
Figura 19 – Poropressões da Análise 2 após uma chuva de $1,60 \times 10^{-6}$ m/s com duração de 24 horas	35
Figura 20 – Poropressões da Análise 3 para o tempo 0 hora.....	36
Figura 21 – Poropressões da Análise 3 após uma chuva de $1,60 \times 10^{-6}$ m/s com duração de 24 horas	36
Figura 22 – Análise 1 de estabilidade no tempo 0 hora	37
Figura 23 – Análise 1 de estabilidade com nível freático após uma chuva de $1,60 \times 10^{-6}$ m/s com duração de 24 horas	37
Figura 24 – Análise 2 de estabilidade no tempo 0 hora	37
Figura 25 – Análise 2 de estabilidade com nível freático após uma chuva de $1,60 \times 10^{-6}$ m/s com duração de 24 horas	38
Figura 26 – Análise 3 de estabilidade no tempo 0 hora	38

Figura 27 – Análise 3 de estabilidade com nível freático após uma chuva de $1,60 \times 10^{-6}$ m/s com duração de 24 horas	38
--	----

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Tabela 1 – Fatores de segurança mínimos.....	22
Tabela 2 – Parâmetros do resíduo.....	27
Tabela 3 – Dados de Chuva em fevereiro de 2026 para Juiz de Fora	27
Tabela 4 – Direção dos movimentos das análises de estabilidade de taludes	31
Tabela 5 – Coordenadas dos intervalos de pesquisa.....	31
Tabela 6 – Análises de estabilidade de taludes.....	38

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABREMA	Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento de Alertas e Desastres Naturais
CNN BRASIL	Cable News Network Brasil
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
PJF	Prefeitura de Juiz de Fora
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	11
1.2	OBJETIVOS.....	12
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1	ATERROS INDUSTRIAIS.....	14
2.2	LIXIVIADO	16
2.3	PARÂMETROS GEOTÉCNICOS	17
2.4	ÁGUA EM MATERIAIS GEOTÉCNICOS	20
2.5	ESTABILIDADE DE TALUDES.....	21
2.6	EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS.....	22
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO ATERRO E DA ÁREA DE ESTUDO.....	25
3.2	LEVANTAMENTO DE DADOS PLUVIOMÉTRICOS	27
3.3	UTILIZAÇÃO DE MODELAGEM DE FLUXO E ANÁLISE DE ESTABILIDADE 27	
3.3.1	SOFTWARES	27
3.3.2	ANÁLISE DE FLUXO DEVIDO A CHUVA EXTREMA.....	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
4.1	ANÁLISE DE FLUXO	32
4.2	ANÁLISE DE ESTABILIDADE.....	37
5	CONCLUSÕES.....	40
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população no Brasil no censo de 2022 correspondia a mais de 203 milhões de habitantes, um aumento de cerca de 6,5 % em relação ao censo de 2010 (IBGE, 2022). O aumento da população combinado à obsolescência programada, na qual a vida útil dos produtos é reduzida para incentivar a compra de novos, têm como consequência o aumento da produção e consumo de bens (Grubba; Locatelli, 2023).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) instituída pela Lei nº 12.305/2010 determinou o fim dos lixões, destinação final considerada ambientalmente incorreta, pois os resíduos são lançados diretamente no solo, sem impermeabilização, drenagem e tratamento do chorume, podendo ocorrer a contaminação do solo e lençol freático pelo lixiviado (BRASIL, 2010). Em 2024, cerca de 40,3 % dos resíduos sólidos urbanos produzidos no Brasil ainda não possuíam destinação final adequada (ABREMA, 2025). Mesmo após 15 anos da PNRS, a realidade do Brasil é que ainda existem mais de 1700 lixões ativos, conforme os dados mostrados por Araújo (2025).

O aterro sanitário é a única forma de destinação final de resíduos considerada adequada, pois é uma obra de engenharia com o objetivo de minimizar os impactos à saúde pública e ao meio ambiente (ABNT, 1992). Entretanto, a seleção de áreas aptas para a implantação de novos aterros sanitários é um processo complexo, dificultando ainda mais a destinação final adequada dos resíduos (Righi, 2021). Sendo assim, o aumento na geração de resíduos, combinado à dificuldade em determinar áreas para implantação de novos aterros sanitários, tem como consequência a tendência de verticalização das células dos aterros já existentes, tornando-se evidente a importância de garantir a estabilidade da massa de resíduos (Suzuki, 2012).

Nesse contexto, diversos fatores podem influenciar o comportamento geotécnico do maciço, destacando-se a presença e o acúmulo de fluidos no interior do aterro, que podem elevar as poropressões e comprometer sua estabilidade. A quantidade de lixiviado produzido está diretamente relacionada às condições climatológicas da região em que o aterro está inserido, especialmente em relação à infiltração de água proveniente das precipitações (Righi, 2017). Dessa forma, a adequada operação e manutenção dos sistemas de drenagem superficial de águas

pluviais são fundamentais para minimizar a entrada de água no maciço de resíduos, reduzindo a geração de lixiviado e contribuindo para a estabilidade do aterro.

Nos últimos anos, tem sido observado um aumento na frequência e na intensidade de eventos climáticos extremos em diversas regiões do Brasil, incluindo episódios de precipitação intensa, conforme registros do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2026). O aumento do volume de chuvas pode elevar o teor de umidade dos resíduos, favorecer a formação e o acúmulo de lixiviado e aumentar as poropressões no interior do maciço, fatores que podem comprometer sua estabilidade (Carvalho, 2020). A partir desse cenário, a avaliação da estabilidade de aterros sob cenários de precipitações extremas do ponto de vista pontual e também temporal, torna-se essencial para garantir a segurança operacional do empreendimento, prevenir processos de ruptura e minimizar riscos ambientais e socioeconômicos associados a possíveis falhas.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a influência da precipitação extrema ocorrida no dia mais chuvoso de fevereiro de 2026 na cidade de Juiz de Fora, Minas Gerais, sobre a estabilidade de um aterro industrial. Como objetivos específicos, propõe-se a avaliar os fatores de segurança do aterro industrial e avaliar a evolução das poropressões durante o evento chuvoso.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em cinco capítulos, incluindo este capítulo introdutório.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, abordando os principais conceitos relacionados aos aterros industriais, ao fluxo de água em meios não saturados, à estabilidade de taludes e à influência de eventos climáticos extremos sobre essas estruturas.

O Capítulo 3 apresenta os materiais e métodos adotados no estudo, incluindo a caracterização da área de estudo, os dados pluviométricos utilizados, a definição dos parâmetros geotécnicos e hidráulicos e as modelagens numéricas desenvolvidas nos softwares SEEP/W e SLOPE/W, utilizando, respectivamente, o método dos elementos finitos e a teoria do equilíbrio limite.

O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos nas análises de fluxo e de estabilidade, avaliando a influência da precipitação extrema sobre as poropressões e os fatores de segurança do aterro industrial.

Por fim, o Capítulo 5 reúne as conclusões do trabalho, destacando as principais conclusões, as limitações da pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ATERROS INDUSTRIAIS

Os aterros industriais são obras de engenharia que têm por objetivo receber resíduos de Classe I, considerados perigosos de acordo com a NBR 10004 volume 1 (ABNT, 2024). Eles são projetados especificamente para receber resíduos que apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade. A disposição desses materiais requer um controle ambiental mais rigoroso, devido ao elevado potencial de contaminação do solo e das águas. Portanto, a NBR 10157 (ABNT, 1987) propõe algumas medidas a serem adotadas, visto que existem algumas diferenças em relação aos aterros sanitários convencionais, como a necessidade de um plano de emergência e sistema duplo de impermeabilização, com detecção de vazamentos entre as duas camadas.

De acordo com Loureiro (2005), a operação de aterros industriais necessita de uma intervenção cuidadosa, já que determinados materiais podem apresentar incompatibilidade química e reagir quando dispostos em contato uns com os outros. Para evitar tal fato, é fundamental que os resíduos sejam previamente caracterizados e identificados pelo gerador, permitindo a avaliação de suas propriedades e dos riscos associados ao seu manejo. A NBR 12235 fornece uma tabela de incompatibilidade de resíduos, descrevendo os efeitos que podem resultar da mistura de materiais quimicamente incompatíveis (ABNT, 1992). A interação entre resíduos quimicamente incompatíveis pode ocasionar diversos fenômenos, incluindo a geração de calor, incêndios, explosões, emissão de gases e fumos tóxicos ou inflamáveis, aumento da solubilidade de substâncias perigosas e ocorrência de reações de polimerização de forma violenta (Pinto, 2011).

As etapas de construção de um aterro industrial seguem a mesma linha de um aterro sanitário convencional, salvo algumas como necessidade de um plano de emergência e impermeabilização dupla da base (ABNT, 1987). As etapas de impermeabilização da base, drenagem de chorume, drenagem de gás, drenagem superficial, camadas de cobertura e encerramento são passos fundamentais na construção de um aterro industrial (ABNT, 1987). A Figura 1 mostra um exemplo de aterro sanitário.

Figura 1 – Aterro Sanitário de Brasília, Distrito Federal



Fonte: Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal (2021)

A drenagem superficial tem a função de captar e conduzir as águas pluviais, evitando sua infiltração no maciço de resíduos e, conseqüentemente, reduzindo a geração de lixiviado. Esse sistema é implantado após a conclusão de cada célula do aterro e é composto por estruturas como canaletas, caixas de passagem e escadas hidráulicas (Righi, 2021). Seu dimensionamento deve considerar as características hidrológicas e pluviométricas da região, bem como a vazão de projeto, de forma a assegurar o adequado escoamento superficial e minimizar a infiltração de água no maciço, conforme os critérios estabelecidos pela NBR 13896 (ABNT, 1997).

O sistema de drenagem de chorume consiste em uma camada drenante de alta permeabilidade, normalmente formada por brita, associada a uma camada filtrante constituída por areia ou geotêxtil. Tubulações perfuradas podem ser incorporadas à camada drenante para coletar e transportar o percolado até os reservatórios de acumulação. O dimensionamento do sistema é realizado de forma a favorecer o escoamento gravitacional, dispensando, na maioria dos casos, o uso de equipamentos de bombeamento (Righi, 2021).

Além do lixiviado, a decomposição dos resíduos também gera o biogás. O acúmulo de gases gerados no aterro sanitário pode causar impactos ambientais e riscos à segurança, como a formação de bolsões gasosos e possíveis explosões. Assim, deve ser previsto um sistema de drenagem de gases, podendo este ser integrado ao sistema de drenagem de percolados (ABNT, 1992). A Figura 2 mostra um exemplo de drenagem de chorume na horizontal, interligados por um dreno vertical responsável pela drenagem dos gases.

Figura 2 – Drenos de chorume interligados ao dreno de gás



Fonte: Righi (2021)

Há também as camadas de cobertura, que podem ser diárias para proteção de uma camada de resíduos ou final, quando o aterro já está encerrado. Os materiais utilizados são solo de baixa permeabilidade ou geossintético, reduzindo a infiltração de água no maciço e controlando a emissão de biogás para a atmosfera (Mariano, 2008; Righi, 2011).

Por fim, há o encerramento do aterro, porém a NBR 8419 (ABNT, 1992) não fala especificamente quais medidas de monitoramento devem ser tomadas. Segundo Righi (2017), o gerenciamento de aterros encerrados requer o monitoramento de lixiviados, gases e dos possíveis impactos ambientais sobre as águas, o solo e o ar.

2.2 LIXIVIADO

O lixiviado (também chamado de chorume) é o líquido gerado a partir da decomposição dos resíduos enterrados. Nos aterros industriais, a geração de lixiviado pode ocorrer em decorrência da infiltração de águas pluviais e da umidade presente nos resíduos. Durante a percolação através do maciço, esse líquido pode solubilizar compostos químicos e transportar contaminantes, tornando necessária a implantação de sistemas de impermeabilização e drenagem para prevenir impactos ao solo e às águas subterrâneas (ABNT, 1987).

Segundo Righi (2017), alguns fatores podem influenciar a geração de lixiviado, como as condições climáticas e hidrogeológicas no local em que o aterro está inserido. O índice

pluviométrico do local está diretamente ligado a quantidade de lixiviado produzido, quanto maior o índice pluviométrico, maior a geração de lixiviado (Pinto, 2011).

A composição gravimétrica dos resíduos aterrados; a forma de operação do aterro, o número de células construídas, a impermeabilização da base, a forma como os resíduos são compactados; o tipo de cobertura; o sistema de drenagem; o grau de compactação dos resíduos e o tipo de cobertura final, representam fatores influentes na geração do lixiviado (Fiuza *et al.*, 2000; Gomes, Silva, 2005; Lôbo, 2006).

2.3 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

Os parâmetros geotécnicos são fundamentais para a análise e o desenvolvimento de projetos de engenharia. Eles representam as propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas dos materiais, como resistência, deformabilidade e permeabilidade, sendo essenciais para a avaliação de seu comportamento e para a garantia de um dimensionamento adequado das estruturas, a fim de garantir segurança e estabilidade das obras. Nos resíduos, devido a sua heterogeneidade, os parâmetros geotécnicos desses materiais apresentam grande variabilidade, o que torna mais complexa a determinação de valores representativos a serem utilizados em análises de estabilidade (Bosco, 2008).

O peso específico (γ) é a relação entre o peso total e o seu volume total, sua unidade no Sistema Internacional (SI) é kN/m^3 . Em resíduos, o peso específico depende principalmente da composição gravimétrica, da distribuição granulométrica, do grau de compactação, da cobertura diária e do grau de degradação (Lima; Rodrigues, 2015; Bosco, 2008).

O teor de umidade (w) é a relação entre o peso da água intersticial e o peso das partículas sólidas, em porcentagem. A umidade dos resíduos apresenta variação em função da composição gravimétrica, das condições climáticas e dos procedimentos operacionais do aterro, como as camadas de cobertura e os sistemas de drenagem (Carvalho, 1999; Borgatto, 2010). Além disso, o aumento do índice pluviométrico favorece a infiltração de água no maciço, elevando o teor de umidade dos resíduos e a geração de percolato, enquanto períodos de estiagem tendem a reduzir esse parâmetro. A Equação 1 representa a fórmula necessária para o cálculo do teor de umidade dos resíduos.

$$w = \frac{M_w}{M_s} * 100 \quad (1)$$

Onde:

w : Teor de umidade de RSU na base seca (%)

M_w : Massa de água

M_s : Massa de RSU seca

O coeficiente de permeabilidade (k) representa a facilidade de um fluido em atravessar os vazios do material. A composição gravimétrica e o grau de compactação são fatores que influenciam o coeficiente de permeabilidade (Borgatto, 2006). Para obtenção do coeficiente de permeabilidade de materiais mais finos, é utilizado o permeâmetro de carga variável. Já para materiais mais granulares, o permeâmetro de carga constante.

A compressibilidade é a redução de volume após a aplicação de uma determinada carga e está relacionada ao recalque dos maciços (Catapreta, 2008). A compressão dos maciços sanitários ocorre em função das cargas aplicadas sobre os resíduos sólidos urbanos (RSU) e das transformações que esses materiais sofrem ao longo do tempo. Os principais mecanismos de compressão em maciços sanitários são solicitação mecânica, alterações físico-químicas, biodegradação e dissipação de poropressões de líquidos e gases. Em aterros sanitários, é importante a estimativa do recalque, pois com a redução do volume de resíduos, a vida útil do projeto aumenta (Boskov, 2008).

2.3.1 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE MATERIAIS GEOTÉCNICOS

A resistência ao cisalhamento de um material geotécnico corresponde à máxima tensão de cisalhamento que ele suporta antes da ruptura e está diretamente associada, principalmente, a dois parâmetros: o ângulo de atrito interno e a coesão. O ângulo de atrito é o maior ângulo possível entre a força vertical e a força normal à superfície de contato, sem que haja deslocamento relativo entre as partículas. Já a coesão corresponde à parcela de resistência decorrente das forças de atração entre as partículas, sendo influenciada, entre outros fatores, pela composição e pelas características mineralógicas do material (Lambe; Whitman, 1969, Pinto, 2006).

Entre os critérios utilizados para descrever o comportamento dos solos, destacam-se o critério de Coulomb e o critério de Mohr (Pinto, 2006). Segundo o critério de Coulomb, o solo entra em ruptura quando a tensão cisalhante atuante supera o valor obtido pela Equação 2. A resistência ao cisalhamento é representada pela envoltória de Mohr, obtida a partir de círculos

de Mohr referentes ao estado de tensões na ruptura em ensaios triaxiais realizados sob diferentes tensões confinantes (Lambe; Whitman, 1969).

$$\tau_f = c + \sigma' \cdot \tan \varphi \quad (2)$$

Onde:

τ_f : Tensão de cisalhamento na ruptura

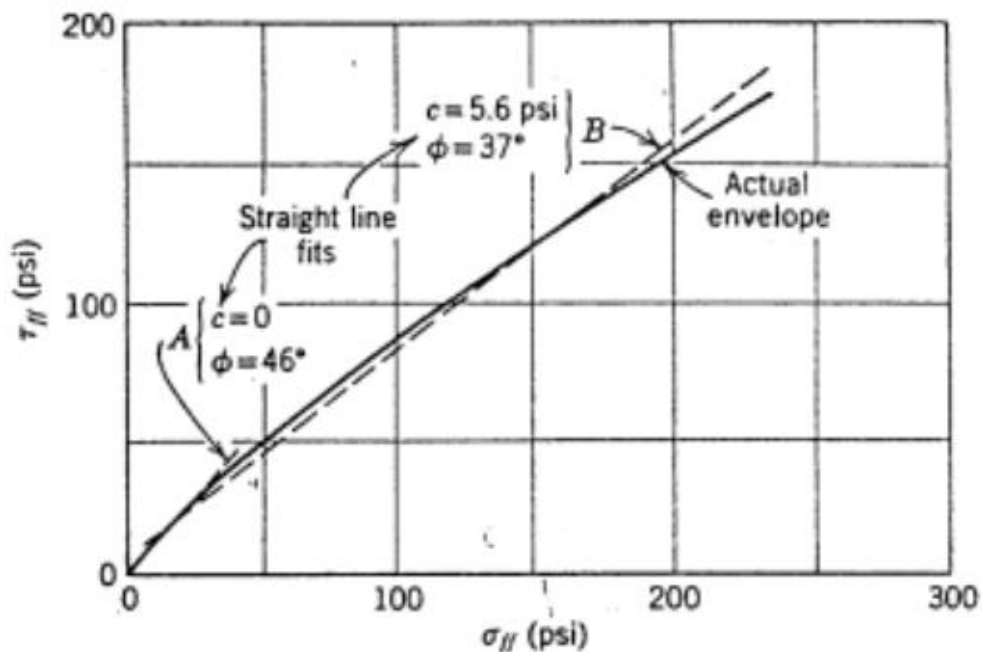
c : coesão

σ' : tensão normal efetiva

φ : ângulo de atrito

Embora essa envoltória seja, em geral, curva, para fins práticos costuma-se aproximá-la por uma reta, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Aproximação da envoltória de Mohr-Coulomb por uma reta



Fonte: Adaptado de Lambe e Whitman (1969)

A equação da reta apresentada na Figura 3 é originada da lei de resistência de Mohr-Coulomb, com base na Equação 2, percebe-se que a coesão e o ângulo de atrito constituem os parâmetros

da reta de resistência ao cisalhamento, sendo associado ao intercepto da reta com o eixo das tensões cisalhantes e ϕ relacionado à sua inclinação (Lambe; Whitman, 1969).

2.4 ÁGUA EM MATERIAIS GEOTÉCNICOS

O estado não saturado de um material geotécnico é considerado um sistema trifásico, líquido (água), gasoso (ar) e sólido. Nos materiais não saturados, ocorre a sucção matricial, que corresponde à força que a retenção de água exerce no material, sendo resultante dos fenômenos de capilaridade e adsorção. Seu valor está diretamente relacionado às características da matriz do material geotécnico (Burgos; Conciani, 2015; Lima; Rodrigues, 2015).

Nesse contexto, o fluxo de água em meios não saturados ocorre através dos poros interconectados e é governado por gradientes de potencial hidráulico e pela sucção matricial do solo. Diferentemente dos meios saturados, a presença de ar nos vazios reduz a continuidade dos caminhos de fluxo, fazendo com que a condutividade hidráulica varie conforme o grau de saturação. Dessa forma, a água se desloca de regiões de maior potencial para regiões de menor potencial hidráulico, sendo influenciada tanto por efeitos gravitacionais quanto capilares (Machado; Vilar, 2015).

Diante disso, a poropressão positiva é a pressão que a água causa no material geotécnico quando preenche seus vazios, superior a pressão atmosférica. O aumento desse parâmetro afeta diretamente a resistência ao cisalhamento, pois provoca a redução da tensão efetiva atuante em um potencial plano de escorregamento. Dessa forma, precipitações intensas podem favorecer o acúmulo de água no maciço e elevar a poropressão, comprometendo a estabilidade do maciço de resíduos (Borgatto, 2006).

A quantidade de água armazenada no solo pode ser representada por diferentes índices físicos, os quais são fundamentais para a compreensão do comportamento hidráulico e mecânico dos solos não saturados. O teor de umidade gravimétrico relaciona a massa de água à massa de sólidos, enquanto o teor volumétrico corresponde à razão entre o volume de água e o volume total da amostra. Já o grau de saturação é a razão entre o volume de água e o volume de vazios, indicando a proporção dos vazios preenchidos por água. Esses parâmetros são fundamentais para avaliar o armazenamento de água e o comportamento hidráulico e geotécnico do solo, incluindo infiltração, fluxo e estabilidade (Lima; Rodrigues, 2015; Burgos; Conciani, 2015).

De acordo com Gerscovich (2016), a infiltração de água no talude provoca a redução da sucção do material e, dependendo da intensidade e do tempo de duração das chuvas, pode diminuir a resistência ao cisalhamento e comprometer a estabilidade do maciço. Nesse contexto, a curva característica desempenha papel fundamental, pois descreve a relação entre o teor de umidade volumétrico e a sucção matricial do material. Essa relação é influenciada pelo tipo de material, da distribuição de tamanho de vazios e frações granulométricas, e permite compreender o comportamento hidráulico do material diante da infiltração e suas implicações na estabilidade (Barbosa *et al*, 2015).

2.5 ESTABILIDADE DE TALUDES

A estabilidade de um talude no contexto de aterros sanitários é a capacidade do maciço de resíduos e de seus taludes permanecerem em equilíbrio, sem a ocorrência de rupturas, escorregamentos ou deformações excessivas que possam comprometer sua segurança e operação. Essa condição é atingida quando a resistência ao cisalhamento ao longo de uma superfície potencial de ruptura é superior às tensões cisalhantes nela desenvolvidas. Essa resistência é determinada pelas propriedades geotécnicas do material, principalmente pela coesão e pelo ângulo de atrito (Das; Sobhan, 2019).

De acordo com Tabalipa e Fiori (2008), os três principais fatores que condicionam a estabilidade de uma encosta em seu estado natural são sua geometria, as características geológicas dos materiais que a compõem e as condições do ambiente fisiográfico. Este último engloba aspectos como clima, cobertura vegetal, regime de drenagem natural e demais elementos ambientais que influenciam o comportamento do terreno.

As análises de estabilidade de taludes podem ser realizadas por meio de Métodos de Equilíbrio Limite e métodos numéricos. Os Métodos de Equilíbrio Limite incluem os Métodos das Fatias, como Bishop, Janbu e Morgenstern-Price, enquanto os métodos numéricos abrangem técnicas de análise de tensões e deformações, como o método dos elementos finitos e o método das diferenças finitas (Gerscovich, 2016).

Segundo Gerscovich (2016), pode-se calcular a análise de estabilidade através do Fator de Segurança (FS) a partir da Equação 3. O FS é a relação entre a resistência ao cisalhamento do material geotécnico e as tensões cisalhantes na superfície de ruptura.

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \quad (3)$$

Onde:

τ_f = Tensão resistente

τ_{mob} = Tensão mobilizada

Considerando a ausência de normas específicas voltadas à estabilidade de aterros sanitários, utilizam-se os critérios geotécnicos empregados na análise de rupturas de taludes de encostas. De acordo com a NBR 11682 da ABNT (2009), o projeto deve considerar a perda de vidas humanas e danos materiais e ambientais. A partir disso, pode-se definir Fatores de Segurança mínimos conforme apresentado na Tabela 1 (ABNT, 2009).

Tabela 1 – Fatores de segurança mínimos

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Fonte: ABNT (2009)

2.6 EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), órgão das Nações Unidas responsável por avaliar as evidências científicas relacionadas às mudanças climáticas, eventos climáticos extremos correspondem à ocorrência de valores de variáveis meteorológicas e climáticas acima ou abaixo de limites próximos aos extremos da distribuição observada, caracterizando condições raras para determinada região e período do ano (IPCC, 2023).

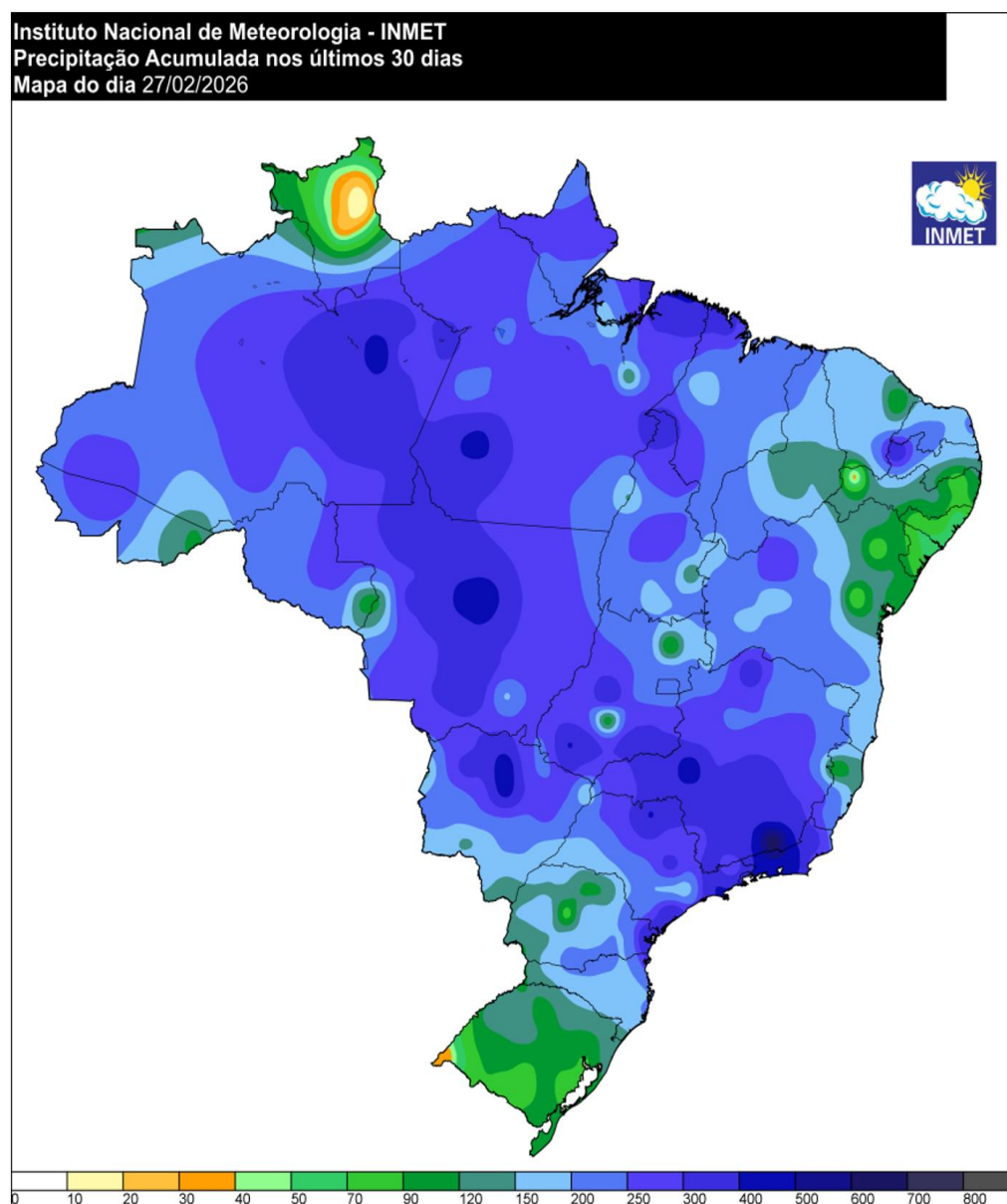
O Centro Nacional de Monitoramento de Alertas e Desastres Naturais (CEMADEN) associa o aumento da temperatura global aos eventos climáticos extremos, como ondas de calor sem precedentes, secas, incêndios e chuvas intensas. Em 2025, o Brasil registrou um padrão de precipitação irregular, com volumes de chuva superiores à média histórica em algumas regiões, períodos de seca prolongada em outras e a ocorrência de eventos climáticos extremos ao longo do ano (CEMADEN, 2026).

De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), em fevereiro de 2026, o Brasil apresentou um regime de chuvas bastante irregular. Enquanto as regiões Norte, Centro-Oeste e Sudeste registraram volumes expressivos de precipitação, com acumulados superiores a 200

mm em diversas áreas, o Nordeste apresentou distribuição heterogênea das chuvas e a Região Sul registrou precipitações abaixo da média em grande parte de seu território. Esse cenário evidencia a ocorrência de contrastes pluviométricos significativos entre as diferentes regiões do país.

A Figura 4 apresenta o mapa do acumulado de precipitação (mm) em fevereiro de 2026. Tons em azul escuro indicam áreas mais chuvosas, cuja redução de volumes é representada pela gradação do azul claro, passando pelo verde escuro/claro até os tons de laranja/amarelo (INMET, 2026).

Figura 4 – Mapa do acumulado de precipitação (mm) em fevereiro de 2026



Fonte: INMET (2026)

No mês de fevereiro de 2026, a cidade de Juiz de Fora registrou chuvas extremas que resultaram em uma das maiores tragédias climáticas da história recente do município. Em poucos dias, a cidade registrou volumes pluviométricos muito superiores à média climatológica, tornando fevereiro de 2026 o mês mais chuvoso da série histórica. Entre os dias 22 e 24 de fevereiro, foram acumulados aproximadamente 229,9 mm de chuva, enquanto o total mensal ultrapassou 579 mm, valor cerca de 240% superior à média histórica para o período (INMET, 2026).

As precipitações intensas provocaram enchentes, transbordamento do Rio Paraibuna, deslizamentos de terra, desabamentos de muros, interdição de vias e isolamento de diversos bairros, além de causar perdas humanas, deixar centenas de famílias desabrigadas e levar o município a decretar estado de calamidade pública (PJF, 2026; CNN BRASIL, 2026). Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de compreender os efeitos de eventos pluviométricos extremos sobre obras geotécnicas, como aterros industriais, uma vez que o aumento da infiltração de água pode alterar as condições hidráulicas do maciço e comprometer sua estabilidade.

As precipitações extremas comprometem a estabilidade de aterros sanitários pelo aumento da infiltração de água no maciço, elevando a poropressão e consequentemente, reduzindo a resistência ao cisalhamento dos resíduos e aumentando o peso do material, podendo desencadear rupturas de taludes (Norafidi *et al.*, 2024). Sem sistemas adequados de drenagem, o acúmulo de percolato potencializa o risco de colapso, como observado em deslizamentos agravados por chuvas intensas (CEMADEN, 2021).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO ATERRO E DA ÁREA DE ESTUDO

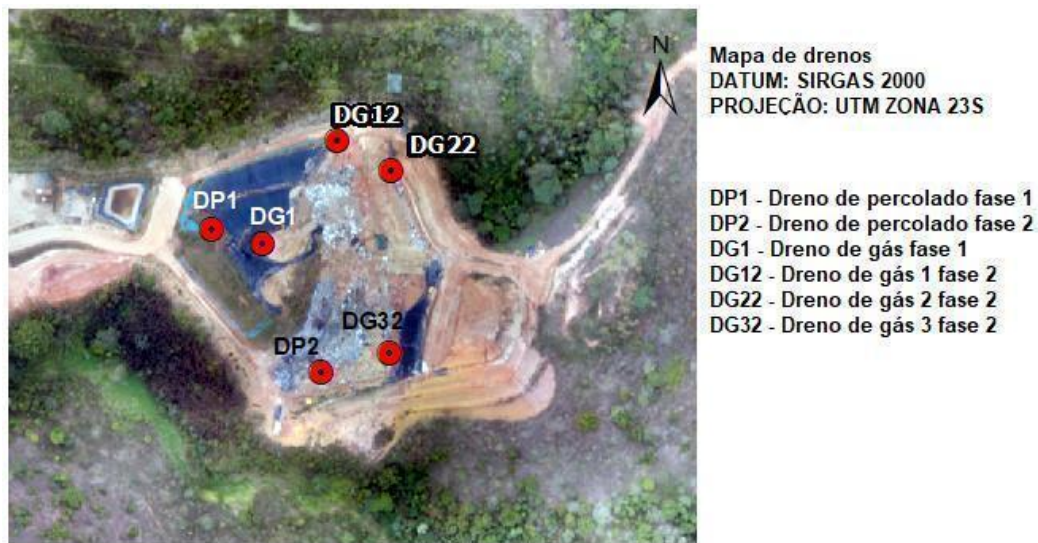
O aterro industrial objeto do presente trabalho é o mesmo estudado em Santana (2022), localizado na cidade de Juiz de Fora, em Minas Gerais. A nomenclatura utilizada em Santana (2022) para designar o aterro foi Aterro “A” e este termo será mantido no presente trabalho. A geometria foi reproduzida através das informações fornecidas pela empresa responsável pela gestão do aterro. Para uma melhor compreensão da estrutura do aterro “A”, a Figura 5 apresenta as fases de operação, a Figura 6 representa os drenos presentes em cada uma das fases e a Figura 7, os perfis para caracterização do aterro, traçados pela equipe de topografia. Vale ressaltar que as figuras apresentadas das fases são do ano de 2022 e não retratam a atual situação em que o aterro se encontra.

Figura 5 – Fases de Operação do aterro “A”



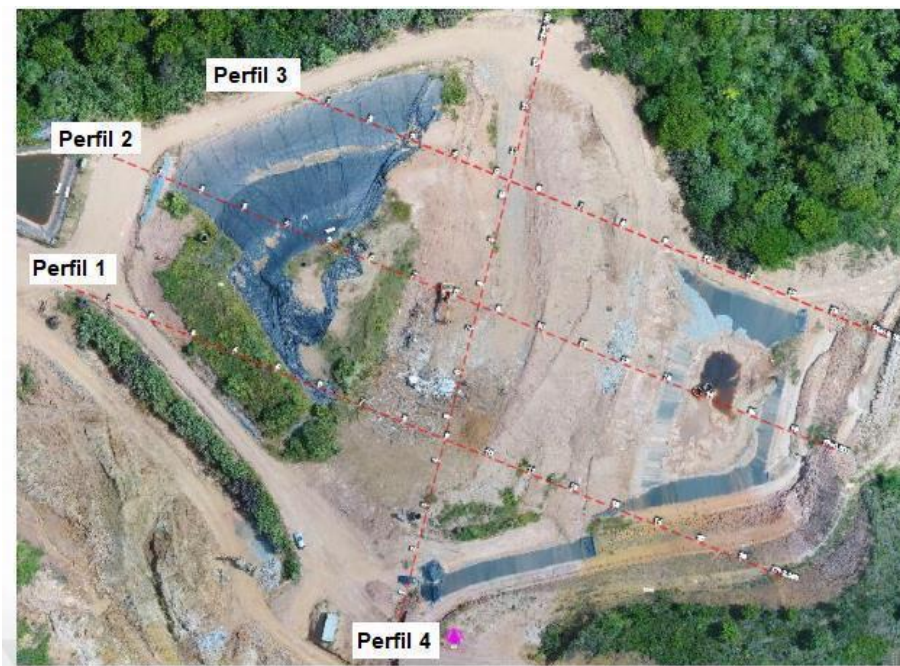
Fonte: Uai Soil (2021) *apud* Santana (2022)

Figura 6 – Drenos de Gás e Percolado instalados nas Fases 1 e 2



Fonte: Uai Soil (2021) *apud* Santana (2022)

Figura 7 – Seções 1, 2, 3 e 4 traçados pela equipe de topografia do Aterro “A”



Fonte: Uai Soil (2021) *apud* Santana (2022)

As análises realizadas no presente trabalho serão correspondentes ao Perfil 2, mostrado na Figura 6, pois este abrange as fases concluída e em operação, mostradas na Figura 4. Foram usados os mesmos dados de Santana (2022), que são originados do relatório técnico disponibilizado. Os parâmetros do resíduo são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros do resíduo

Material	γ (kN/m³)	ϕ (°)	c' (kPa)
Resíduo Classe I	9,3	28,5	5

Fonte: Uai Soil (2021) *apud* Santana (2022)

3.2 LEVANTAMENTO DE DADOS PLUVIOMÉTRICOS

O mês de fevereiro de 2026 destacou-se como o mais chuvoso na história da cidade de Juiz de Fora, conforme apresentado na Tabela 3. A partir desta tabela, é possível observar que o volume de precipitação no mês de fevereiro de 2026, que foi de 752,4 mm, equivale a 4 (quatro) vezes mais do que a média histórica para o período.

Tabela 3 – Dados de Chuva em fevereiro de 2026 para Juiz de Fora

Município	Total de chuva – fevereiro/2026 (mm)	Normal climatológica para o mês de fevereiro (mm)
Juiz de Fora - MG	752,4	170,3

Fonte: INMET (2026)

Já em relação ao dia de maior precipitação do mês de fevereiro de 2026, o maior volume diário acumulado na estação de Juiz de Fora foi no dia 24, onde foram registrados 138,6 mm de chuva (INMET, 2026).

3.3 UTILIZAÇÃO DE MODELAGEM DE FLUXO E ANÁLISE DE ESTABILIDADE

3.3.1 SOFTWARES

O GeoStudio é um pacote de softwares que permite a modelagem de análises geotécnica e ambiental. Ele funciona como um sistema integrado, onde é possível analisar diferentes processos físicos, como fluxo de água e estabilidade, no mesmo projeto (SEEQUENT, 2026). Os softwares do GeoStudio utilizados no presente trabalho são SLOPE/W e SEEP/W.

O SEEP/W é um modelo que utiliza o método de elementos finitos para simular o fluxo de água subterrânea, seja em meios porosos saturados ou não. O programa permite realizar análises em regime permanente (estado estacionário) e transiente (considerando o tempo), possibilitando a avaliação da variação do fluxo ao longo do tempo em diversas obras da engenharia geotécnica, como barragens e aterros sanitários. Entre os principais resultados obtidos estão a poropressão, o nível freático, os gradientes hidráulicos, as linhas de fluxo e as vazões de percolação,

parâmetros fundamentais para a análise do comportamento hidráulico e da estabilidade das estruturas geotécnicas (SEEQUENT, 2026).

O SLOPE/W é um modelo para executar análises de estabilidade, que utiliza a teoria do equilíbrio limite para calcular o FS de uma potencial superfície de ruptura. Ele possui diferentes métodos de análise, como Bishop, Janbu, Spencer e Morgenstern-Price. Os principais resultados obtidos do software são o FS, a localização da superfície crítica de ruptura, a distribuição das forças atuantes e a influência das condições hidráulicas na estabilidade do maciço. É possível importar os resultados de fluxo de água do SEEP/W e avaliar a influência das chuvas e do fluxo de água na estabilidade de taludes e aterros de maneira mais representativa (SEEQUENT, 2026).

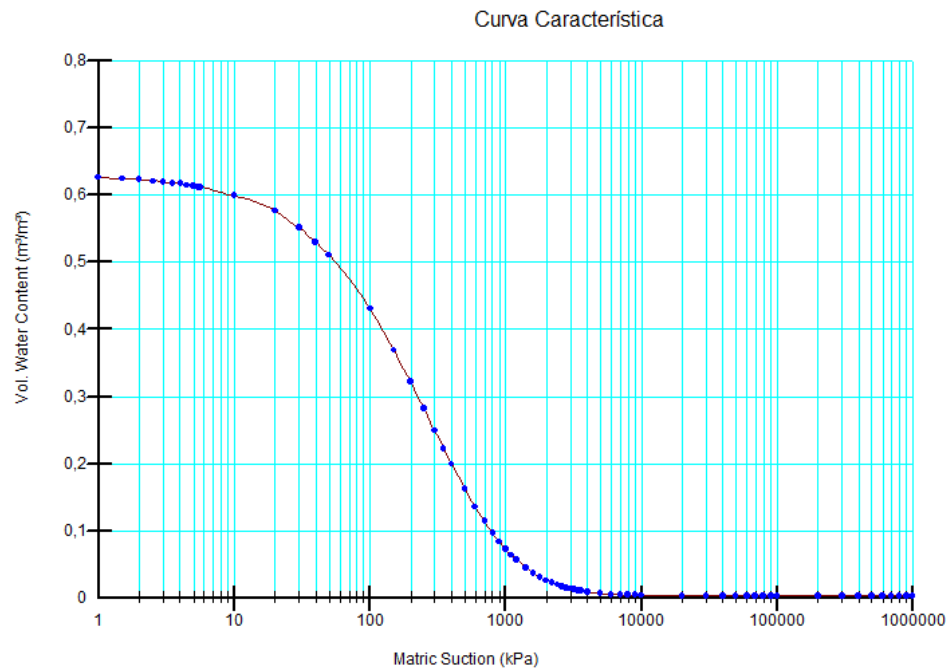
3.3.2 ANÁLISE DE FLUXO DEVIDO A CHUVA EXTREMA

3.3.2.1 SEEP/W

Para a realização da modelagem no SEEP/W, utilizou-se como base a geometria usada por Santana (2022). A análise foi executada em regime transiente (*Transient Analysis*), pois considera a variação do tempo, com duração total de 24 horas. As condições iniciais de poropressão foram definidas por meio da opção *Initial Head/PWP Conditions from: Other GeoStudio Analysis*.

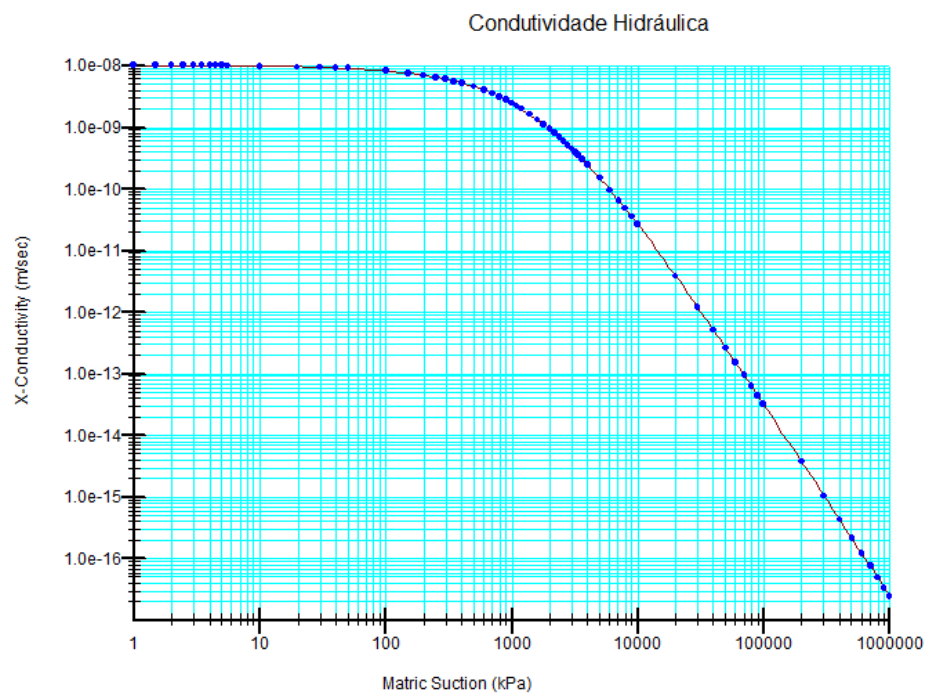
Foi considerado um único material para representar a massa de resíduos do aterro. Em razão da indisponibilidade de parâmetros hidráulicos específicos para o aterro A, foram utilizados valores obtidos na literatura. A curva característica foi definida a partir dos resultados experimentais de Righi (2011), enquanto os parâmetros da função de condutividade hidráulica não saturada foram adotados de Izzo (2008). Dessa forma, os parâmetros empregados não representam diretamente os resíduos do aterro estudado, devendo ser interpretados como uma aproximação para a realização das simulações. Além disso, adotou-se o valor de compressibilidade de 0,10635 kPa, correspondente ao inverso do módulo volumétrico (K), parâmetro que relaciona a deformação volumétrica às variações da pressão da água nos poros, conforme Santana (2022).

Figura 8 – Curva Característica do resíduo



Fonte: Adaptado de Righi (2011)

Figura 9 – Curva de condutividade hidráulica do resíduo



Fonte: Adaptado de Izzo (2008)

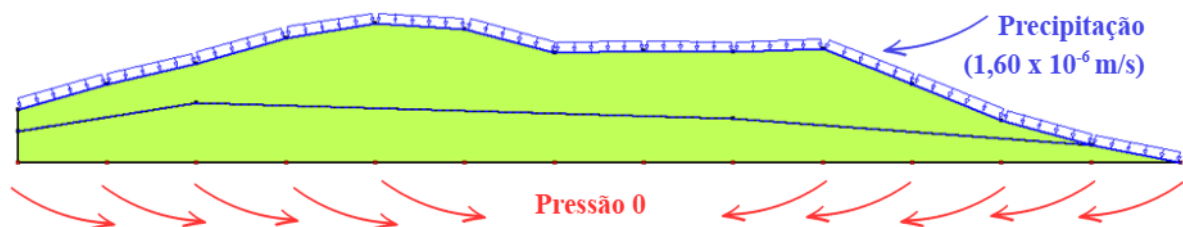
Comparando as curvas apresentadas na Figura 8 e na Figura 9 com curvas características típicas de solos, observa-se que a curva da Figura 8 apresenta comportamento semelhante ao de um material siltoso, enquanto a da Figura 9 se assemelha ao de um silte argiloso. Essa comparação indica uma compatibilidade entre as propriedades hidráulicas dos resíduos utilizadas nos estudos de Righi (2011) e Izzo (2008), justificando a adoção conjunta desses parâmetros na modelagem.

Para representar o evento extremo de precipitação pontual, foi utilizada a chuva máxima diária registrada em 24 de fevereiro de 2026, correspondente a 138,6 mm, convertida em fluxo unitário (*Unit Flux*) através da Equação 4 de $1,60 \times 10^{-6}$ m/s e aplicada sobre a superfície do aterro.

$$q \text{ (m/s)} = \frac{q \text{ (mm/dia)}}{1000 \text{ (m)} \times 86400 \text{ (s)}} \quad \text{Equação 4}$$

Para simular o escoamento do lixiviado, foram inseridos drenos na base do aterro, espaçados a cada 10 m, aos quais foi atribuída a condição de contorno Pressão Zero (*Zero Pressure*). O espaçamento adotado deve-se à ausência de informações sobre a localização exata dos drenos existentes, sendo sua representação destinada apenas a reproduzir o caminho preferencial do fluxo do lixiviado, sem considerar a extração efetiva de líquido do maciço, conforme procedimento adotado por Santana (2022). A linha de divisão observada aproximadamente na metade do aterro corresponde à altura média do lixiviado, conforme informado no Relatório Técnico de Santana (2022). A geometria com as condições de contorno descritas são apresentadas na Figura 10.

Figura 10 – Modelagem final do aterro “A”



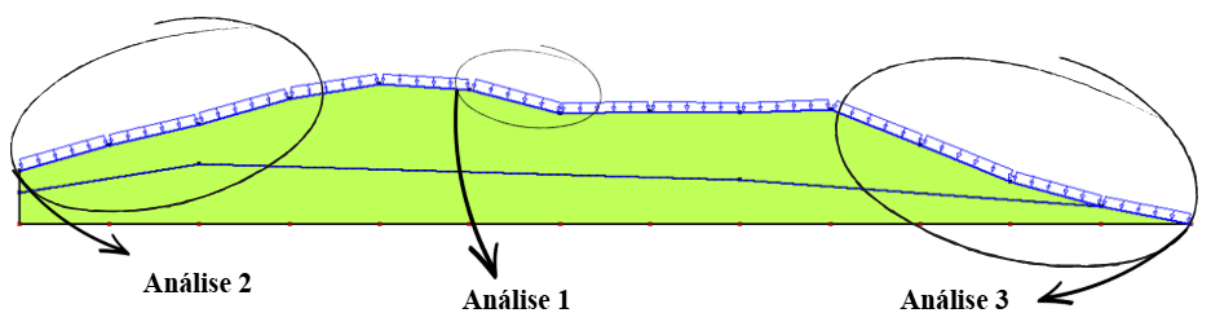
Fonte: Autora (2026)

3.3.2.2 SLOPE/W

Para o cálculo do FS, utilizou-se o método de Morgenstern-Price, a escolha desse método justifica-se por ele não impor restrições quanto à forma da superfície de ruptura, sendo aplicável tanto a superfícies circulares quanto não circulares, o que é relevante em maciços heterogêneos

(Morgenstern & Price, 1965). Inserir-se os parâmetros do resíduo apresentados na Tabela 2 e criou-se as análises de estabilidade. Para o presente trabalho, analisou-se a estabilidade no Perfil 2, apresentado na Figura 7, por englobar tanto a parte de operação concluída quanto a parte de operação futura do aterro. O Perfil 2 foi subdividido em três taludes suscetíveis à ruptura, que podem ser observadas na Figura 11. A Tabela 4 apresenta as análises que foram executadas.

Figura 11 – Análises de estabilidade de taludes



Fonte: Autora (2026)

Tabela 4 – Direção dos movimentos das análises de estabilidade de taludes

Análises	Direção do movimento
Análise 1	Da esquerda para direita
Análise 2	Da direita para esquerda
Análise 3	Da esquerda para direita

Fonte: Autora (2026)

Neste trabalho, utilizou-se o tipo de análise de entrada e saída da superfície. A Tabela 5 apresenta as coordenadas dos intervalos de pesquisa utilizados em cada análise.

Tabela 5 – Coordenadas dos intervalos de pesquisa

Análises	Intervalo de entrada (lado esquerdo)				Intervalo de saída (lado direito)			
	Pt à Esquerda		Pt à Direita		Pt à Esquerda		Pt à Direita	
	x	y	x	y	x	y	x	y
Análise 1	42,7757	15,3418	53,276	14,0553	57,7108	12,8712	67,4966	12,3799
Análise 2	0	5,97	11,8698	9,1613	25,2133	12,571	42,5305	15,3558
Análise 3	81,6019	12,3929	97,4041	9,7824	115,1119	3,3284	129,252	0,1459

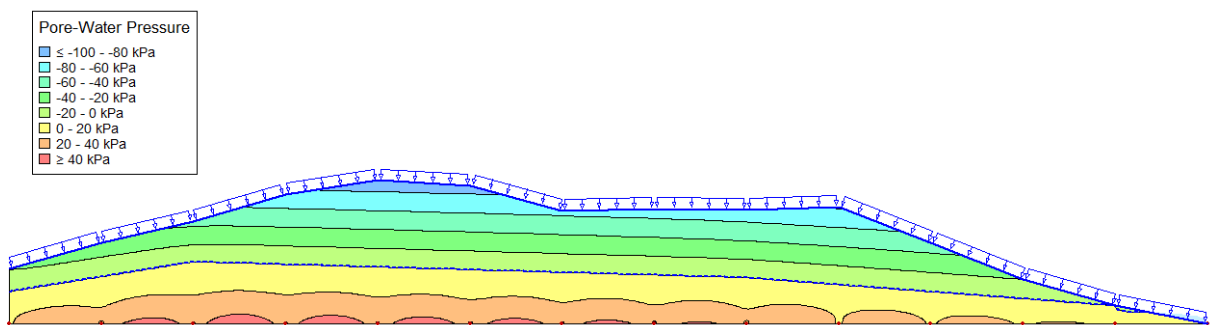
Fonte: Autora (2026)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DE FLUXO

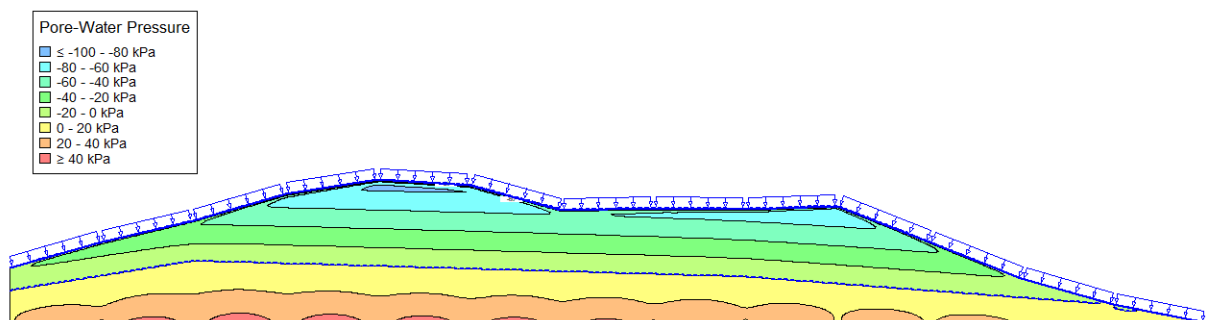
Os resultados obtidos pela modelagem de fluxo no Seep/W são apresentados na Figura 12 e na Figura 13. A Figura 12 representa o estado inicial de poropressões, que antecede a inserção de chuvas no maciço, considerando apenas a pressão do lixiviado. A variação de tais poropressões entre a base e o topo do aterro foi de 40 a -80, respectivamente. Já a Figura 13 representa o estado final de poropressões após a chuva de 24 horas, que apresentou variação de 40 a 0 entre a base e o topo do aterro. Com esses valores, observa-se que o material está funcionando como saturado.

Figura 12 – Poropressões iniciais antes da chuva de $1,60 \times 10^{-6}$ m/s



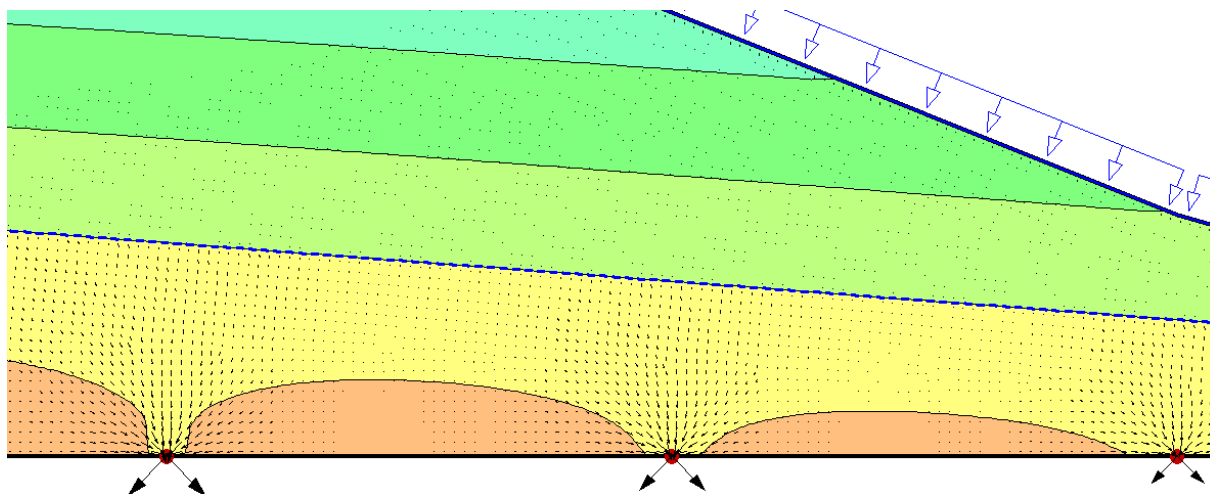
Fonte: Autora (2026)

Figura 13 – Poropressões após uma chuva de $1,60 \times 10^{-6}$ m/s com duração de 24 horas



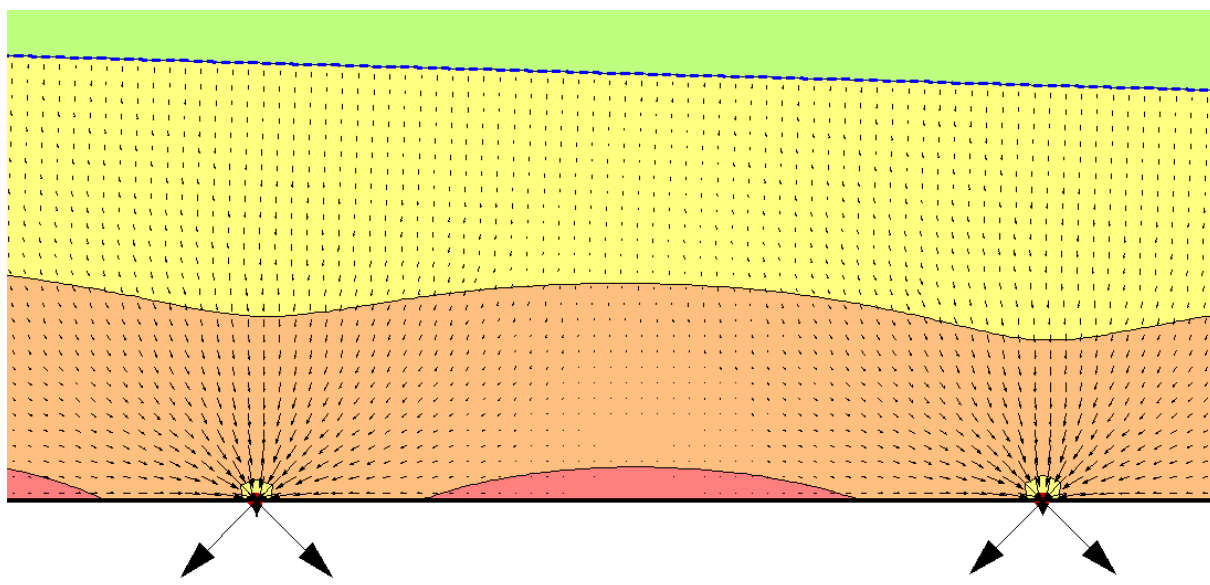
Fonte: Autora (2026)

Figura 14 – Poropressões nos pontos de Pressão 0 na parte direita do aterro



Fonte: Autora (2026)

Figura 15 – Poropressões nos pontos de Pressão 0 na parte central do aterro

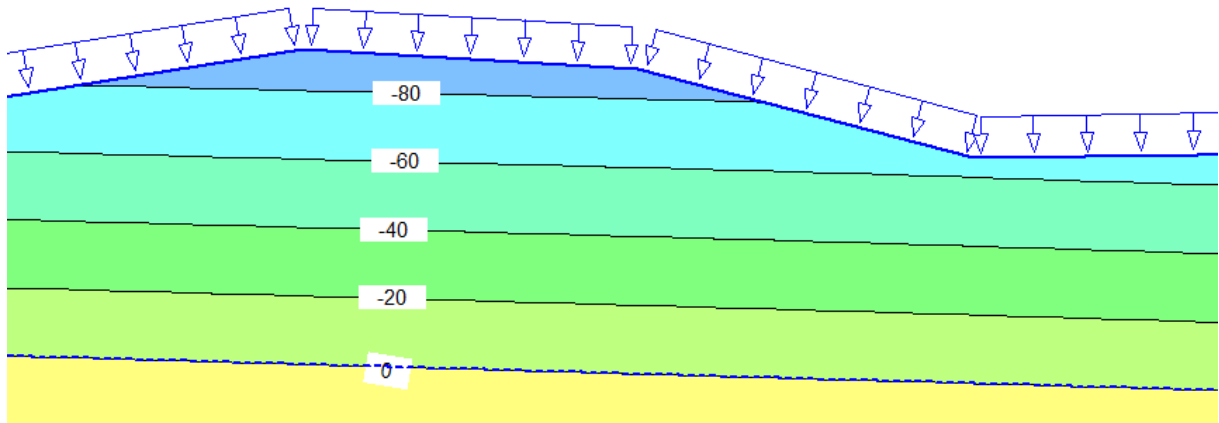


Fonte: Autora (2026)

A partir da Figura 14 e da Figura 15, é possível confirmar que a modelagem está funcionando como o esperado, visto que o fluxo está indo para os pontos de Pressão 0.

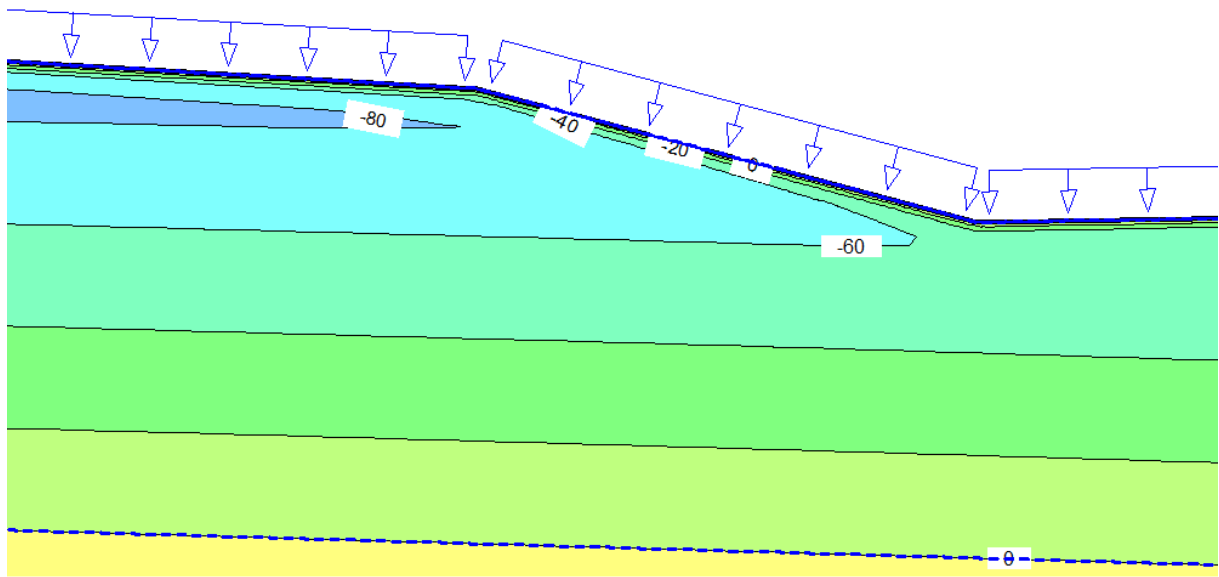
A fim de apresentar as diferenças das situações das poropressões em cada análise realizada, as figuras a seguir apresentam um zoom focando em cada uma delas. Em relação à Análise 1, a Figura 16 mostra o estado inicial das poropressões, que estavam entre -60 no pé do talude analisado e -80 na crista. Já a Figura 17 apresenta a variação após a chuva de $1,60 \times 10^{-6}$ m/s com duração de 24 horas, que variou entre -60 e 0.

Figura 16 – Poropressões da Análise 1 para o tempo 0 hora



Fonte: Autora (2026)

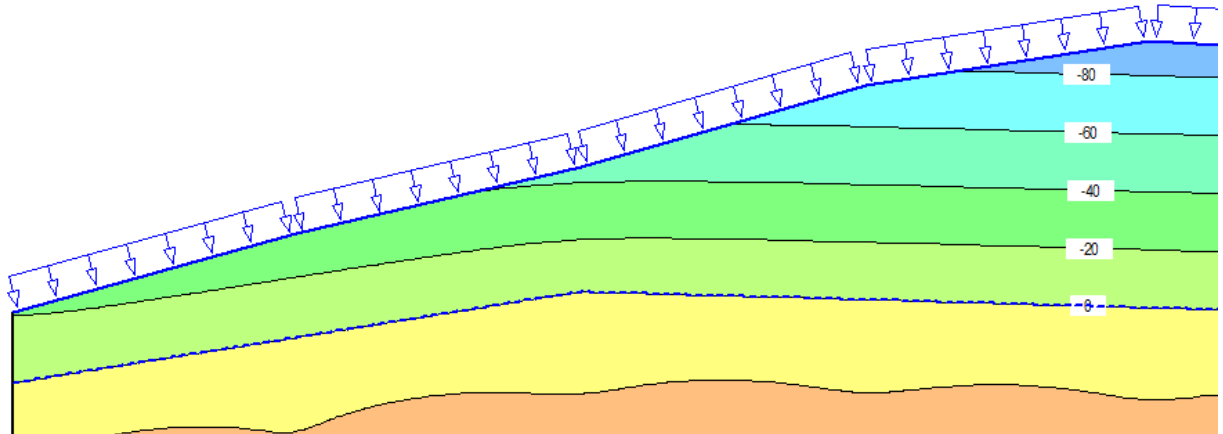
Figura 17 – Poropressões da Análise 1 após uma chuva de $1,60 \times 10^{-6}$ m/s com duração de 24 horas



Fonte: Autora (2026)

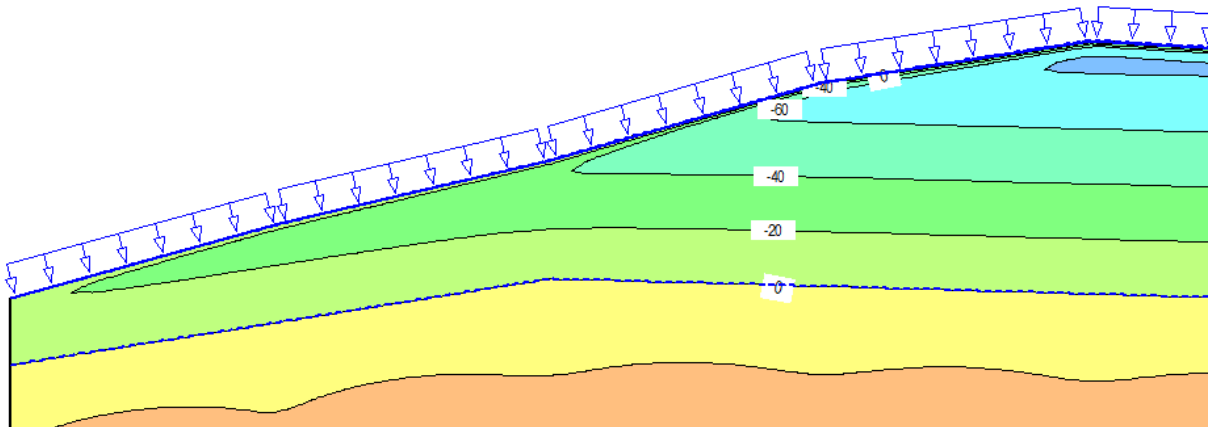
A respeito da Análise 2, a Figura 18 mostra o estado inicial das poropressões, que estavam entre 0 no pé do talude analisado e -80 na crista. Já a Figura 19 apresenta a variação após a chuva de $1,60 \times 10^{-6}$ m/s com duração de 24 horas, que foi 0 tanto no pé quanto na crista do talude.

Figura 18 – Poropressões da Análise 2 para o tempo 0 hora



Fonte: Autora (2026)

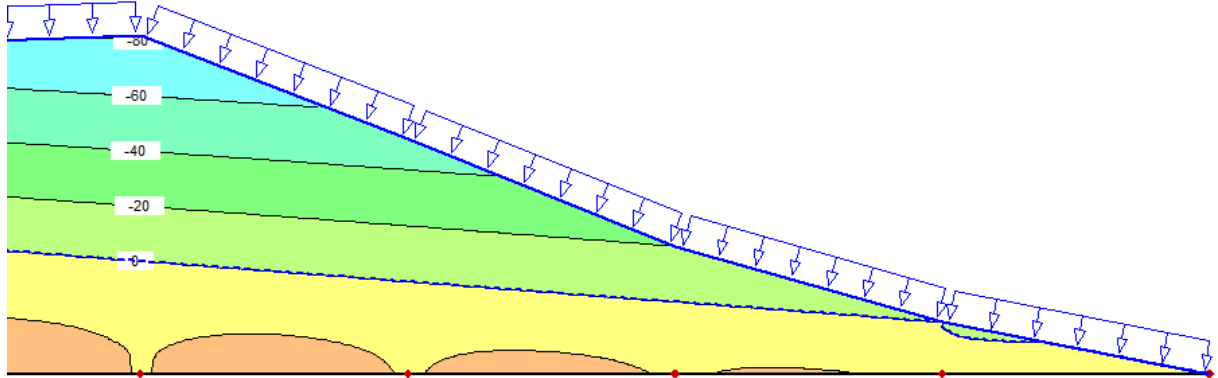
Figura 19 – Poropressões da Análise 2 após uma chuva de $1,60 \times 10^{-6}$ m/s com duração de 24 horas



Fonte: Autora (2026)

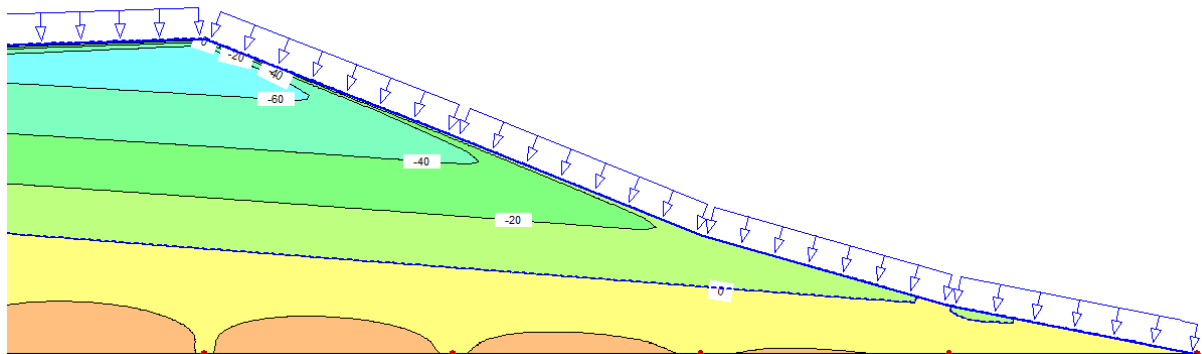
Por fim, na Análise 3, as poropressões variaram inicialmente entre 20 no pé do talude e -80 na crista no tempo 0 hora, conforme mostra a Figura 20. Já a Figura 21 apresenta a variação após a chuva de $1,60 \times 10^{-6}$ m/s com duração de 24 horas, que foi 20 no pé do talude e 0 na crista.

Figura 20 – Poropressões da Análise 3 para o tempo 0 hora



Fonte: Autora (2026)

Figura 21 – Poropressões da Análise 3 após uma chuva de $1,60 \times 10^{-6}$ m/s com duração de 24 horas



Fonte: Autora (2026)

A diferença entre as situações apresentadas indica uma redução na sucção do solo na região superficial do talude, provocada pela infiltração de água da chuva. Esse comportamento é compatível com a resposta esperada de materiais não saturados submetidos à infiltração de água. À medida que a infiltração avança, ocorre redução das poropressões negativas, principalmente nas camadas mais superficiais do maciço.

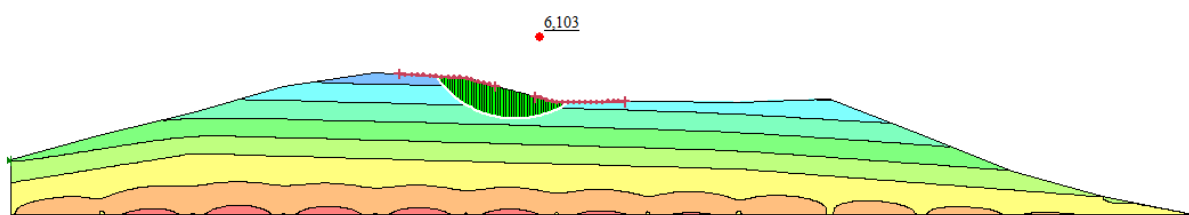
Além disso, verifica-se que as maiores alterações ocorreram próximas à superfície dos taludes, enquanto as porções mais profundas mantiveram valores de poropressão semelhantes aos observados na condição inicial. Esse comportamento indica que o tempo de duração da precipitação, embora associado a um evento extremo, não foi suficiente para promover uma redistribuição significativa das pressões neutras em todo o maciço.

Os resultados obtidos demonstram que a precipitação intensa provocou principalmente uma redução da sucção matricial, sem ocasionar um aumento expressivo das poropressões positivas. Como consequência, a tensão efetiva dos resíduos sofreu apenas pequenas alterações.

4.2 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

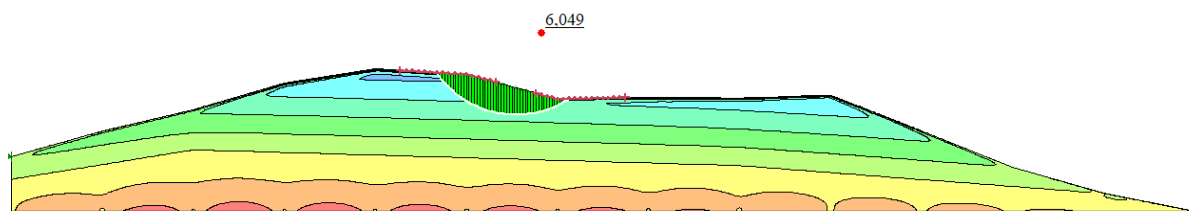
Com base nos resultados da modelagem hidráulica realizada no SEEP/W, foram calculados, no SLOPE/W, os fatores de segurança dos taludes em dois momentos: na condição inicial, antes da ocorrência da precipitação, e após a aplicação de uma precipitação com intensidade equivalente a $1,60 \times 10^{-6}$ m/s durante 24 horas, para as três análises realizadas. A Figura 22 a Figura 23, Figura 24, a Figura 25, a Figura 26 e a Figura 27 apresentam os resultados obtidos, permitindo a comparação dos fatores de segurança antes e após o evento de precipitação em cada cenário analisado.

Figura 22 – Análise 1 de estabilidade no tempo 0 hora



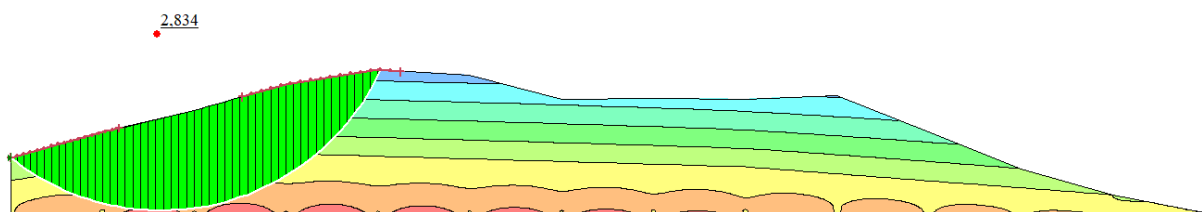
Fonte: Autora (2026)

Figura 23 – Análise 1 de estabilidade com nível freático após uma chuva de $1,60 \times 10^{-6}$ m/s com duração de 24 horas



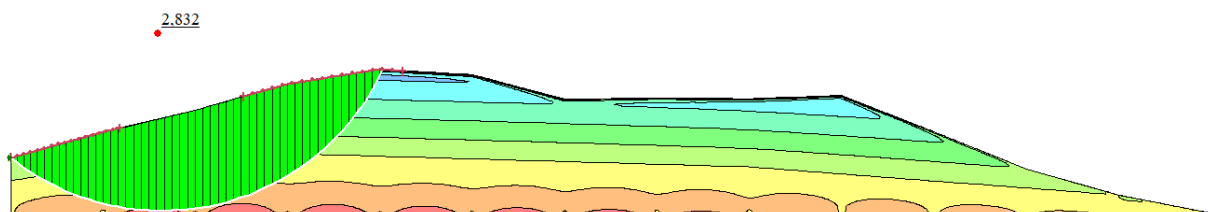
Fonte: Autora (2026)

Figura 24 – Análise 2 de estabilidade no tempo 0 hora



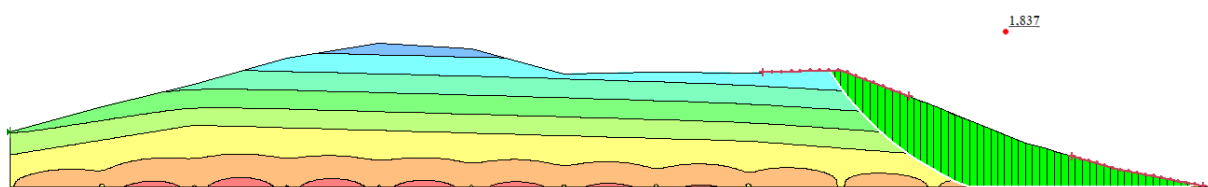
Fonte: Autora (2026)

Figura 25 – Análise 2 de estabilidade com nível freático após uma chuva de $1,60 \times 10^{-6}$ m/s com duração de 24 horas



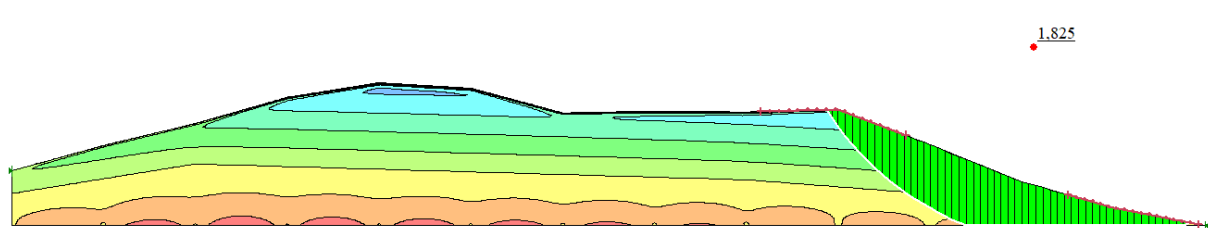
Fonte: Autora (2026)

Figura 26 – Análise 3 de estabilidade no tempo 0 hora



Fonte: Autora (2026)

Figura 27 – Análise 3 de estabilidade com nível freático após uma chuva de $1,60 \times 10^{-6}$ m/s com duração de 24 horas



Fonte: Autora (2026)

A Tabela 6 reúne os fatores de segurança obtidos nas três análises, sintetizando os resultados apresentados nas figuras anteriores.

Tabela 6 – Análises de estabilidade de taludes

Análises	FS antes da chuva extrema	FS após chuva extrema de $1,60 \times 10^{-6}$ m/s com duração de 24 horas
Análise 1	6,109	6,049
Análise 2	2,834	2,832
Análise 3	1,837	1,825

Fonte: Autora (2026)

Conforme os resultados apresentados na Tabela 6, a precipitação extrema provocou reduções no fator de segurança em todas as análises realizadas. A Análise 1 apresentou a maior variação, com redução de 0,88%, seguida da Análise 3, com 0,65%, enquanto a Análise 2 registrou a menor variação, de apenas 0,07%.

Apesar da ocorrência de um evento pluviométrico extremo, correspondente ao maior acumulado diário registrado em Juiz de Fora durante o mês de fevereiro de 2026, todos os fatores de segurança permaneceram superiores ao valor mínimo de 1,5 recomendado pela ABNT NBR 11682 (2009) para situações com elevado nível de segurança. Esse resultado evidencia que, para a geometria e os parâmetros geotécnicos adotados na modelagem, o aterro manteve condições satisfatórias de estabilidade mesmo após a infiltração decorrente da precipitação simulada.

Embora tenha sido observada redução dos fatores de segurança em todas as análises, as variações foram pouco expressivas, indicando que a infiltração decorrente de 24 horas de chuva intensa exerceu influência limitada sobre a estabilidade global do aterro. Isso ocorreu porque a frente de infiltração permaneceu restrita às camadas superficiais do maciço, não promovendo alterações significativas nas condições hidráulicas das regiões mais profundas, onde normalmente se desenvolvem as superfícies críticas de ruptura.

A maior redução do fator de segurança observada na Análise 1 pode ser atribuída à menor inclinação do talude, que favoreceu a infiltração da água em relação ao escoamento superficial. Além disso, a infiltração promoveu a redução da sucção matricial nas camadas superficiais, diminuindo parcialmente a resistência ao cisalhamento dos resíduos.

Os resultados indicam que, para as condições simuladas, a estabilidade do aterro permaneceu predominantemente condicionada à geometria dos taludes e aos parâmetros de resistência dos resíduos, enquanto os efeitos da precipitação extrema apresentaram influência secundária. Ressalta-se, contudo, que esses resultados se referem às condições específicas adotadas na modelagem, de modo que eventos de maior duração, chuvas consecutivas ou diferentes condições de drenagem podem produzir respostas distintas.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da precipitação extrema ocorrida em fevereiro de 2026, na cidade de Juiz de Fora (MG), sobre a estabilidade de um aterro industrial, por meio da modelagem numérica de fluxo no SEEP/W e da análise de estabilidade no SLOPE/W. Para isso, foi simulado o evento correspondente ao maior acumulado diário de chuva registrado no período, analisando-se a evolução das poropressões e dos fatores de segurança dos principais taludes do aterro.

Os resultados da modelagem de fluxo mostraram que a infiltração da água da chuva promoveu redução das poropressões negativas nas regiões superficiais do maciço, indicando diminuição da sucção matricial. Essa alteração permaneceu concentrada nas camadas superficiais durante o período de 24 horas analisado.

Em relação à estabilidade, verificou-se uma pequena redução dos fatores de segurança em todas as análises realizadas. Apesar dessa diminuição, todos os valores permaneceram superiores ao fator de segurança mínimo recomendado pela ABNT NBR 11682 (2009), indicando que, para as condições de geometria, propriedades geotécnicas e hidráulicas adotadas na modelagem, a precipitação extrema simulada não comprometeu a estabilidade global do aterro industrial.

Os resultados obtidos evidenciam que, nas condições analisadas, a resposta hidráulica do maciço foi insuficiente para gerar aumentos expressivos das poropressões positivas ao longo das superfícies críticas de ruptura. Dessa forma, a estabilidade permaneceu predominantemente condicionada às características geométricas do aterro e aos parâmetros de resistência dos resíduos, enquanto os efeitos da infiltração exerceram influência limitada sobre o comportamento global da estrutura.

Como limitações do estudo, destaca-se que as análises foram realizadas considerando apenas um evento de precipitação com duração de 24 horas, utilizando parâmetros hidráulicos e geotécnicos obtidos da literatura e de estudos anteriores para o mesmo aterro. Além disso, a localização dos drenos foi representada de forma simplificada, devido à indisponibilidade de informações detalhadas sobre sua real disposição. Ressalta-se ainda que as propriedades hidráulicas adotados na modelagem foram obtidos de trabalhos desenvolvidos para outros materiais e estudos anteriores, não sendo provenientes de ensaios específicos realizados com os resíduos do aterro analisado. Dessa forma, embora representativos, esses parâmetros podem

não refletir integralmente o comportamento geotécnico e hidráulico do maciço em condições reais.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se, inicialmente, a realização de uma revisão bibliográfica acerca dos parâmetros de condutividade hidráulica de resíduos sólidos, considerando diferentes valores reportados na literatura, seguida da execução de análises numéricas que permitam avaliar a influência desses parâmetros na estabilidade de taludes. Essa recomendação justifica-se pela elevada variabilidade desses parâmetros em resíduos sólidos. Além disso, sugere-se a realização de simulações utilizando diferentes cenários de precipitação extrema, variando tanto a intensidade quanto a duração das chuvas, de modo a avaliar seus efeitos sobre a distribuição das poropressões e verificar se estas podem atingir regiões mais profundas do maciço. Por fim, recomenda-se investigar, com base na literatura técnica e em projetos de aterros industriais, a disposição dos drenos de lixiviado, incluindo seu espaçamento e quantidade, visando representar de forma mais fiel às condições reais de campo e aprimorar a modelagem numérica.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, A. C. S. **Cenário Atual dos Lixões no Brasil: Desafios e Perspectivas**. 2025. 56 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10157**: Aterros de resíduos perigosos - Critérios para projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 1987, 13p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12235**: Armazenamento de Resíduos Sólidos Perigosos - Procedimentos. Rio de Janeiro, 1992, 14p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11682**: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009, 39p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10004-1**: Resíduos Sólidos - Classificação Parte 1: Requisitos de classificação. Rio de Janeiro, 2024, 29p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE – ABREMA. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2025**. São Paulo, 2025. Disponível em: <<https://www.abrema.org.br/panorama/>>. Acesso em: 28 jun. 2026.
- BARBOSA, M. C. *et al.* Transporte de contaminantes e fluxo de gases em solos não saturados. In: CARVALHO, J. C.; GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015, cap. 14, p. 367-413.
- BORGATTO, A. V. A. **Estudo do efeito fibra e da morfologia na estabilidade de aterros de resíduos sólidos urbanos**. 2006. 174 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**, 1a ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil, 2008, 248 p.
- BRASIL. Presidência da república casa civil. Lei de nº12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**,

2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 11 jan. 2026.

BURGOS, P. C.; CONCIANI, W. Índices físicos, textura, consistência e classificação de solos. In: CARVALHO, J. C.; GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015, cap. 8, p. 181-203.

CAMPOS, T. M. P.; MOTTA, M. F. B. A. Resistência ao cisalhamento de solos não saturados. In: CARVALHO, J. C.; GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015, cap. 17, p. 465-497.

CARVALHO, M. F. **Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos**. Tese de Doutorado. 1999. 278 p. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

CARVALHO, A. S. **Avaliação da influência do gerenciamento de um aterro industrial na estabilidade do maciço**. 2020. 32 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2020.

CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da Influência do Projeto, Construção e Operação**. Tese de Doutorado. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008, 316p.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS (CEMADEN). **Precipitação extrema e risco de desastres hidro-geometeorológicos em cenários de aquecimento global**. São José dos Campos: Cemaden, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/cemaden/pt-br>>. Acesso em: 28 jun. 2026.

DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Cengage Learning, 2019, 691 p.

FARIA, F. D. S. **Índice da Qualidade de Aterros de Resíduos Urbanos**. 2002. 312 p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

FIUZA et al. Monitoramento do chorume do Aterro Centro de Salvador. **Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 27, 2000.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R.; WIDGER, R. A. The shear strength of unsaturated soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 15, n. 3, 1978, p. 313-321.

GEOTECH D.O.O. **Impact of Waste Disposal on Landfill Stability**. Rijeka, 2024. Disponível em: <<https://www.geotech.hr/en/impact-of-waste-disposal-on-landfill-stability/>>. Acesso em: 28 jun. 2026.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. 2ª Edição, São Paulo, Oficina de Textos, 2016. 192 p.

GOMES, T. L.; SILVA, C. E. Avaliação quali-quantitativa do percolado gerado no Aterro da Caturrita em Santa Maria – RS. **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**.

GOOGLE EARTH PRO [software]. Versão 7.3. Mountain View: Google, 2026. Disponível em: <<https://www.google.com/earth/versions/>>. Acesso em: 29 jun. 2026.

GRUBBA, L. S; LOCATELLI, H. Obsolescência programada: impactos no desenvolvimento sustentável e sustentado na sociedade contemporânea. **Revista de Direito de Viçosa**, [S. l.], v. 15, n. 1, p. 1-25, 2023. DOI: 10.32361/2023150114617. Disponível em: <<https://periodicos.ufv.br/revistadir/article/view/14617>>. Acesso em: 11 jan. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Panorama do Censo 2022: indicadores**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <<https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/indicadores.html?localidade=BR&tema=1>>. Acesso em: 25 jan. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Tabela de dados das estações**. Brasília, DF, 2026. Disponível em: <<https://tempo.inmet.gov.br/tabela/>>. Acesso em: 26 maio 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Nota sobre os destaques meteorológicos de fevereiro de 2026**. Brasília, DF, 2026. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/noticias/nota-sobre-os-destaques-meteorologicos-de-fevereiro-de-2026>>. Acesso em: 26 maio 2026.

IZZO, R. L. S. **Comportamento de Resíduos Sólidos Inertizados em Barreira Capilar**. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008, 226p.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1969.

LIMA, A.; RODRIGUES, R. A. Terminologia e Simbologia. In: CARVALHO, J. C.; GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015, cap. 1, p. 1-20.

LOBO, E. M. P. S. **Estudo comparativo das características dos líquidos percolados gerados nos aterros metropolitano – PB e no aterro da Muribeca – PE**. 130 p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, 2006.

LOUREIRO, S. M. **Índice de Qualidade no Sistema da Gestão Ambiental em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos - IQS**. 2005. 517 p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MACHADO, S. L.; VILAR, O. M. Potenciais da água no solo. In: CARVALHO, J. C.; GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015, cap. 4, p. 79-96.

MARQUES, A. C. M. **Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos**. 2001. 350p. + Anexos. Tese de Doutorado. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2001.

MARIANO, M. O. H. **Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos**. 2008. 225 f. Tese de Doutorado (Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

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

NORAFIDI, N. N.; TAIB, A. M.; SUHAIZAN, F. S.; PAHLEVI, R. M.; HASBOLLAH, D. Z. A.; IBRAHIM, A. Influence of Rainfall Infiltration on Landfill Slope Stability. **Journal of Hunan University (Natural Sciences)**, v. 51, n. 12, p. 35–44, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55463/issn.1674-2974.51.12.4>. Disponível em: <https://jonuns.com/index.php/journal/article/view/1678>>. Acesso em: 28 jun. 2026.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA - IPCC Mudança do Clima 2023: Relatório Síntese

PINTO, C. d. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006, 367 p.

PINTO, D. P. S. **Contribuição à avaliação de aterros de resíduos industriais**. 2011. 145 f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) – Programa de Engenharia Civil, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

PREFEITURA DE JUIZ DE FORA (PJF). Juiz de Fora decreta estado de calamidade pública após chuvas intensas. **Portal PJF**, Juiz de Fora, 24 fev. 2026. Disponível em: <https://www.pjf.mg.gov.br/noticias/view.php?modo=link2&idnoticia2=88440>. Acesso em: 9 jul. 2026.

RIGHI, J. A. **Estudo do comportamento de barreira capilar em aterros de resíduos**. Dissertação de Mestrado. 152p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

RIGHI, J. A. **Proposta de Índice de Avaliação de Aterros de Resíduos Desativados a partir do Potencial Poluídos do Lixiviado**. 190 p. Tese de Doutorado (Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

SANTANA, A. H. S. **Análise da percolação de lixiviado e sua influência na estabilidade de um aterro industrial**. 2022. 96p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2022.

SEEEQUENT. **GeoStudio 2D**. [S. l.], 30 abr. 2026. Disponível em: <https://www.seequent.com/pt-br/produtos-e-solucoes/geostudio-2d/>. Acesso em: 21 maio 2026.

SOBRINHO, N. L. C. **Uma análise do balanço hídrico do aterro sanitário de Presidente Prudente**. 2000. 128p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

SUZUKI, D. K. **Verticalização de aterros sanitários por meio de reforço com geogrelhas e diques periféricos alteados pelo método de montante**. 2012. 181p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3145/tde-16072013-122419/pt-br.html>>. Acesso em: 14 jun. 2026.

TABALIPA, N. L.; FIORI, A. P. Influência da vegetação na estabilidade de taludes na bacia do Rio Ligeiro (PR). **Geociências**, Rio Claro, v. 27, n. 3, p. 387–399, 2008. Disponível em: <<https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/3369>>. Acesso em: 28 jun. 2026.

UaiSoil. **Relatório Técnico**, 2021. Acervo pessoal.