

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

AMANDA DOS SANTOS CARVALHO

**Avaliação da influência do gerenciamento de um aterro industrial na estabilidade do
maciço**

JUIZ DE FORA – MG

2020

AMANDA DOS SANTOS CARVALHO

Avaliação da influência do gerenciamento de um aterro industrial na estabilidade do maciço

Trabalho Final de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Ambiental e Sanitarista.

Área de concentração: Geotecnia Ambiental

Linha de pesquisa: Resíduos Sólidos

Orientadora: Prof^a. D.Sc., Júlia Righi de Almeida

JUIZ DE FORA – MG

2020

AMANDA DOS SANTOS CARVALHO

Avaliação da influência do gerenciamento de um aterro industrial na estabilidade do maciço

Trabalho Final de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Ambiental e Sanitarista.

Aprovado em 02 de outubro de 2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. D.Sc. Júlia Righi de Almeida – Orientadora
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. D.Sc. Mário Vicente Riccio Filho
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. D.Sc. Samuel Rodrigues Castro
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dedico essa conquista à minha mãe, Elenir, meu porto seguro, por toda dedicação e apoio de sempre, e ao meu pai, Marcos, fonte de sabedoria e, por muitas vezes, também de conhecimento técnico. Com um amor incondicional, me ensinaram valores e se esforçaram para que meus estudos sempre fossem priorizados, me incentivando e dando energia para seguir em frente e conquistar esse tão sonhado diploma. Dedico também ao meu irmão, Alexandre, por torcer por mim, me ensinar e ser meu amigo na vida, inclusive na faculdade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me manter firme nos meus sonhos e tornar tudo possível.

Agradeço o apoio dos meus familiares que acompanham minha história, sempre vibrando comigo a cada etapa e compartilhando muita alegria e amor.

À minha orientadora, Júlia, por toda atenção e carinho comigo, pelo exemplo de professora que é e por todas as oportunidades de aprendizagem que me proporcionou.

Agradeço às amigas que a Engenharia me deu, que viveram todos esses anos comigo, compartilhando momentos de estudo, motivação e diversão.

A todos os amigos que fiz nos segmentos e projetos que participei na UFJF por deixarem um pouco de si e levarem um pouco de mim.

Um agradecimento especial aos professores brilhantes do Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária, que foram inspirações na minha trajetória, pela disponibilidade, orientação e contribuição com suas experiências para a minha formação como profissional.

À amada Universidade Federal de Juiz de Fora, pelo ensino público de qualidade oferecido, pelo acolhimento como segunda casa, por me proporcionar crescimento pessoal e ampliar meus horizontes, além da formação profissional.

Muito obrigada!

“Explicar toda a natureza é uma tarefa difícil demais para qualquer homem ou para qualquer época. É muito melhor fazer um pouco e com certeza e deixar o resto para outros que vêm depois de você.” (Isaac Newton)

RESUMO

Os aterros sanitários são obras de engenharia para disposição final de resíduos sólidos idealizados para receber apenas rejeitos. No entanto, a reciclagem e compostagem ainda são insuficientes no Brasil e a produção de lixo crescente torna a verticalização dessas instalações cada vez mais comum. Esses empreendimentos, como toda e qualquer obra, apresentam riscos e danos potenciais às populações adjacentes e ao meio ambiente, sendo necessário seu acompanhamento através de monitoramento geotécnico e ambiental. O presente trabalho objetiva avaliar a influência da qualidade do gerenciamento de um aterro de resíduos na estabilidade do maciço. Para isso, foram analisados dados de três anos de um aterro classe I em Minas Gerais, a fim de comparar seu comportamento perante diferentes condições naturais e operacionais. Foram obtidos os fatores de segurança para os taludes de interesse, através dos softwares SLOPE/W e SLIDE/W e três métodos de análise –Bishop Simplificado, Janbu Simplificado e Morgenstern-Price–, com o intuito de verificar o atendimento às legislações vigentes, a usabilidade dos programas e confiabilidade dos métodos empregados. Como esperado, foi observado o aumento da instabilidade do maciço a partir da elevação da linha piezométrica com redução média de 16,07% nos fatores de segurança em períodos de maior precipitação e média de 7,93% após decisão operacional de bombeamento de percolado para a fase encerrada.

Palavras-chave: resíduos perigosos, monitoramento geotécnico, fator de segurança, aterro Classe I.

ABSTRACT

Landfills are engineering works for the final disposal of solid waste designed to receive only waste. However, recycling and composting are still insufficient in Brazil and the production of waste is growing, which makes verticalization of these facilities increasingly common. These undertakings, like any and all works, present potential risks and damages to the surrounding populations and to the environment. In this sense, it is necessary to monitor it through geotechnical monitoring studies. The present work aims to evaluate the influence of the quality of the management of a waste landfill on the stability of the massif. For this purpose, three-year data from a class I landfill in Minas Gerais were analyzed in order to compare its behavior under different natural and operational conditions. The safety factors for the slopes of interest were obtained through the software SLOPE/W and SLIDE/W and three methods of analysis –Bishop Simplified, Janbu Simplified and Morgenstern-Price–, in order to verify compliance with current legislation, the usability of the programs and the reliability of the methods employed. As expected, there was an increase in the instability of the massif from the elevation of the piezometric line with an average reduction of 16.07% in safety factors in periods of greater precipitation and an average of 7.93% after the operational decision of pumping percolate to the phase ended.

Keywords: hazardous waste, geotechnical monitoring, safety factor, Class I landfill.

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 1. | INTRODUÇÃO | 11 |
| 2. | METODOLOGIA | 13 |
| 3. | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 20 |
| 3.1 | ANÁLISE DE DADOS | 20 |
| 3.2 | ANÁLISE DE ESTABILIDADE | 21 |
| 3.2.1 | Análise comparativa entre os anos de 2017 e 2018 | 21 |
| 3.2.2 | Análise do ano de 2019 | 22 |
| 3.2.3 | Análise comparativa entre fevereiro e março de 2018 | 22 |
| 3.3 | Índice de Qualidade no Sistema da Gestão Ambiental em Aterros Industriais | 28 |
| 4. | CONCLUSÕES | 28 |
| | REFERÊNCIAS | 30 |

APRESENTAÇÃO

O Presente trabalho foi elaborado e avaliado no formato de artigo técnico visando submissão na revista Engenharia Sanitária e Ambiental, área de concentração Geotecnia Ambiental, Qualis Capes B2, de acordo com as normas definidas na Resolução CCESA nº 14/2019 do Colegiado do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da UFJF, como pré requisito para aprovação na disciplina Trabalho Final de Curso II (ESA098).

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e o desenvolvimento econômico vivenciados desde a 1ª Revolução Industrial estimulam maior produção de bens de consumo e, conseqüentemente, de mais lixo. O panorama mais recente de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil aponta um aumento na geração de resíduos em índice superior ao crescimento populacional (ABRELPE, 2017), o que revela uma cultura de consumismo cada vez mais fortalecida na sociedade. Esse crescente consumo aliado ao desenvolvimento tecnológico impacta também no aumento da produção de lixo eletrônico conforme estimativa do Global E-waste Monitor 2017, que prevê um crescimento de 17% desse resíduo de 2016 até 2021.

Dentre esses resíduos, há os perigosos ou Classe I, que são os que apresentam alguma periculosidade em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas como toxicidade, reatividade, corrosividade, inflamabilidade ou patogenicidade conforme classificação da NBR 10004/2004. Por apresentarem risco potencial ao meio ambiente e à saúde humana, exigem um cuidado adicional no seu manejo de forma a prevenir a contaminação do ar, solo, recursos hídricos e garantir a segurança e saúde públicas. Considerando que o setor industrial é o maior gerador desses resíduos (MMA, 20??) e a notável ampliação na produção, cresce a demanda por sua destinação correta.

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, no que diz respeito à gestão e gerenciamento de resíduos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Entretanto, mesmo sendo a última opção dentre as recomendadas, a solução predominante no Brasil ainda é a disposição final em aterros (FELDHAUS, 2019). Assim, as alturas dos maciços e a busca por locais para novos aterros de resíduos Classe I, também chamados de aterros industriais, tendem a aumentar, sendo de fundamental importância avaliar as condições de operação e estabilidade dessas instalações a fim de evitar impactos ambientais e sociais negativos.

Os aterros industriais, em específico, necessitam de uma maior cautela em seu gerenciamento, pois recebem resíduos perigosos de vários tipos, que podem ser compostos por produtos químicos (cianureto, pesticidas, solventes), metais (mercúrio, cádmio, chumbo) e solventes que ameaçam os ciclos naturais onde são despejados (MONTEIRO, 2006). Segundo a NBR 10157/1987, durante a operação dessas obras, deverá ser elaborado um registro que contenha a descrição e quantidade de cada resíduo perigoso recebido, bem como

a identificação do local onde foi disposto. Com esse reconhecimento, é possível se obter um mapeamento do terreno, que subdivide a área de forma que apenas resíduos compatíveis, ou seja, que não reagem entre si, nem em contato com águas pluviais, estejam depositados perto um do outro. Essa mesma norma apresenta ainda uma listagem de incompatibilidade entre os materiais a fim de evitar efeitos indesejáveis como fogo, geração de calor, lixiviação de substâncias nocivas, explosão e liberação de gases tóxicos nesses empreendimentos. Outra singularidade que a NBR 10157/1987 estabelece para o gerenciamento de aterros industriais é o duplo sistema de impermeabilização, que visa impedir o contato do líquido percolado com o solo e lençol freático, formado por duas camadas impermeabilizantes artificiais ou naturais e um mecanismo de detecção de vazamento entre elas como forma de precaução adicional.

Além dessas particularidades devido às características dos materiais recebidos, há também etapas comuns ao gerenciamento de quaisquer aterros, como a cobertura diária dos resíduos, de forma a impedir a emissão de substâncias tóxicas na atmosfera, a infiltração de chuva no lixo e a proliferação de vetores e as drenagens interna e superficial, a fim de minimizar a infiltração de águas pluviais, bem como a geração e permanência de chorume no interior do maciço, que, ao se acumular, gera instabilidade. É importante ressaltar também o papel da topografia durante toda a fase de operação do aterro, no intuito de acompanhar a alteração dos perfis transversais, o preenchimento de novas áreas e alturas -modelagem geotécnica- e fornecer dados para a etapa de monitoramento geotécnico. No caso desta última etapa citada, é de extrema relevância a correta instrumentação para o adequado gerenciamento do aterro, que visa prever o comportamento do maciço através da instalação de poços de monitoramento, piezômetros, drenos de gases, movimentação de marcos superficiais (recalques) e pluviômetro (RIGHI, 2019). Além disso, devem-se levar em consideração as condições operacionais do aterro como compactação do solo, estado do sistema de drenagem pluvial, tratamento e/ou bombeamento de chorume, e também a análise de estabilidade recomendada pela NBR 10157/1987, em que se determinam fatores de segurança para as seções mais críticas do aterro e verifica-se conformidade com a NBR 11.682/2009, que estabelece os níveis de segurança.

Embora esses critérios sejam estabelecidos por normas e leis, muitos aterros ainda não atendem a esses padrões, realizando a operação de forma incorreta ou negligenciando as técnicas adequadas, seja pelo custo, ausência de conhecimento ou até mesmo pela falta de incentivo e fiscalização dos órgãos responsáveis. Dessa maneira, essas obras estão

suscetíveis à ocorrência de desastres, como a explosão dos gases aprisionados e deslizamentos. Kamiji e Oliveira (2019) ressaltam que as rupturas nos aterros sanitários são extremamente perigosas, pois, além dos prejuízos ambientais, as massas rompidas se liquefazem e se movimentam em altas velocidades, colocando em risco vidas e propriedades.

Nesse sentido, este trabalho objetiva avaliar a influência do gerenciamento de um aterro de resíduos classe I de Minas Gerais na estabilidade do maciço a partir da variação da altura de lixiviado acumulado em seu interior e relação com as condições de gerenciamento apresentadas nos relatórios de monitoramento geotécnico analisados, ratificando a importância do acompanhamento constante da obra durante a operação e pós-fechamento.

2. METODOLOGIA

O presente trabalho avaliou o gerenciamento de um aterro industrial em Minas Gerais, denominado neste artigo como A1, em três anos diferentes, 2017, 2018 e 2019, através dos respectivos relatórios de monitoramento geotécnico. Para isso, a empresa responsável pela operação forneceu documentos técnicos do empreendimento como o *as built*, leituras mensais dos marcos superficiais, poços de monitoramento e drenos de gás instalados, dados de chuva registrados no pluviômetro local, geração de chorume e informações sobre as obras executadas. Além disso, visitou-se o A1, em dezembro de 2019, para verificação das condições de operação através dos sistemas de drenagem de água pluvial, da cobertura dos resíduos e taludes, do gerenciamento do percolado, situação dos instrumentos instalados e ocorrência de erosão. A partir das informações obtidas foi possível realizar a análise de estabilidade de seções do maciço e ainda verificar a evolução das células ao longo dos anos.

Os resíduos recebidos no aterro são verificados quanto à sua natureza, pesados em balança automática e analisados em laboratório dentro do próprio aterro. São dispostos resíduos como espumas, materiais contaminados com óleos, graxas, medicamentos e alguns que passam por pré-tratamento, como é o caso dos lodos de estações de tratamento para solidificação com solo; das pilhas e baterias levadas para encapsulamento e concretagem; e lâmpadas fluorescentes, que passam por um processo de separação do fósforo e mercúrio.

O aterramento ocorre em fases, representadas na Figura 1. Em 2015, foi encerrada a Fase 1 e aberta a Fase 2, que opera até o momento presente.

Figura 1 – Vista superior do A1 com a divisão das fases de operação.



Fonte: Uai Soil, Relatório técnico UFJF, 2019.

Para a análise de estabilidade, foram determinados os fatores de segurança utilizando-se o software SLOPE/W 2020, da GeoSlope International, e o SLIDE/W 6.0, da Rocscience, com o intuito de comparar a usabilidade, funcionamento e precisão de cada um.

O SLOPE/W emprega a teoria do equilíbrio limite para calcular o fator de segurança (FS) dos taludes, podendo analisar problemas simples e complexos para uma variedade de formas de superfície de escorregamento, condições de pressão da água dos poros, propriedades do solo e condições de carregamento (GEOSLOPE, 20??). Para a simulação nesse programa, foram inseridos dados de Entrada e Saída da superfície de pesquisa para direcionar a busca pelo local do talude mais propenso à ruptura. A fim de facilitar a compreensão, as simulações foram divididas em esquerda e direita e realizadas somente na Fase 1 por já estar encerrada e não mais sofrer alteração nos perfis topográficos.

Já o SLIDE/W, é um programa de estabilidade de taludes 2D que avalia o fator de segurança ou a probabilidade de falha de superfícies de rupturas circulares ou não circulares em solo ou encostas de rochas (ROCSCIENCE, 20??). Foi empregada a opção de análise da superfície através do recurso “Auto Grid”, no qual o software aponta a provável superfície mais instável do maciço em um único intervalo de pesquisa direcionado: o *grid*, “grade” em inglês. Os softwares e suas configurações empregadas são apresentadas na Tabela 1.

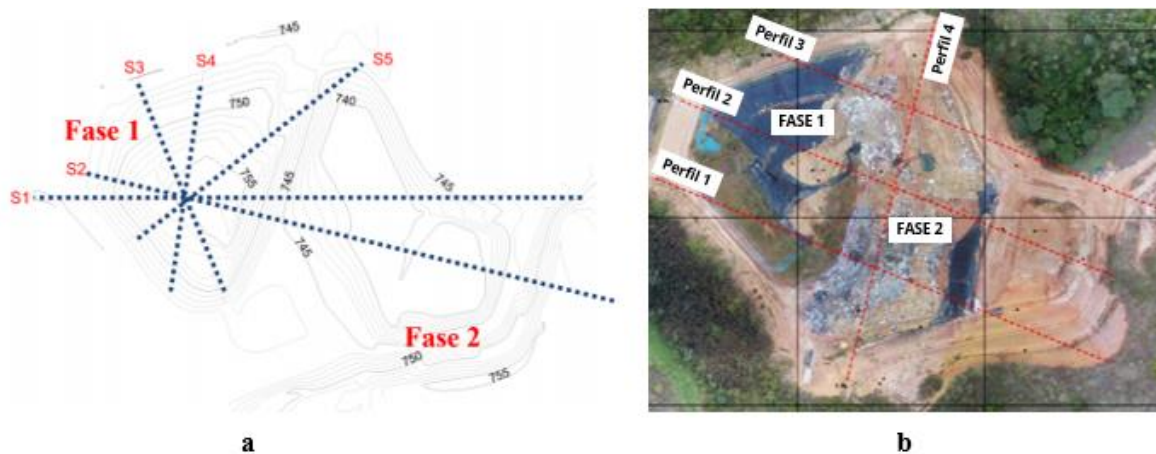
O levantamento topográfico realizado em 2017, cujas seções são apresentadas na Figura 2.a, foi considerado para 2017 e 2018, uma vez que a Fase 1 avaliada já havia sido encerrada e não sofreu alterações no perfil. Isso possibilitou observar a influência direta da variação da pluviometria e da altura de percolado no interior do maciço no fator de segurança. Neste caso, empregaram-se os métodos Bishop Simplificado, Janbu Simplificado e Morgenstern-Price no software SLIDE/W.

É válido ressaltar que, de acordo com Ribeiro (2007), o método Bishop Simplificado é possivelmente o mais utilizado entre as metodologias para análise de estabilidade de taludes, pois é razoavelmente simples e fornece fatores de segurança próximos dos obtidos por métodos mais precisos. Em seu estudo, o autor adotou o método de Bishop Simplificado e o software SLOPE/W para a determinação dos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) de resíduos sólidos através de retroanálises em ensaios de laboratório.

Fernandes e Silva Filho (2010) afirmam que apesar da existência de várias metodologias para a verificação da estabilidade de taludes, os procedimentos teóricos são semelhantes. Grande parte dos métodos se apoia no equilíbrio das forças que atuam na base de uma superfície de escorregamento predeterminada, onde se analisa a relação das forças solicitantes com as forças de resistência ao cisalhamento. Os autores afirmam, também, que a determinação dessas superfícies depende da geometria dos maciços terrosos, que nem sempre são bem caracterizados, “portanto para chegar a um fator de segurança seguro, além de ter as características mecânicas do solo é necessário testar várias superfícies prováveis de escorregamento” (FERNANDES e SILVA FILHO, 2010).

Assim, a fim de ampliar as análises do presente trabalho, avaliou-se também a diferença entre os três métodos de análise –Bishop Simplificado, Morgenstern-Price e Janbu Simplificado–, detalhados na Tabela 1, a partir dos valores de FS obtidos. Neste caso, foram feitas simulações no SLIDE/W e SLOPE/W utilizando a geometria constatada nas seções caracterizadas em 2019 (Figura 2.b). Os taludes analisados são referentes apenas à Fase 1, já que a Fase 2 continua em operação e sofre mudanças nos perfis constantemente.

Figura 2 – Seções transversais dos levantamentos topográficos. **a.** Referentes a 2017 e 2018. **b.** Referentes a 2019.



Fonte: Uai Soil, Relatório técnico UFJF, 2019.

Tabela 1 – Características dos métodos de equilíbrio limite.

| Método | Características |
|----------------------------|---|
| Bishop Simplificado (1955) | Superfície de ruptura circular |
| | Satisfaz o equilíbrio de momentos |
| | Satisfaz o equilíbrio de forças verticais |
| Janbu Simplificado (1968) | Superfície de ruptura qualquer |
| | Satisfaz o equilíbrio de forças verticais e horizontais |
| Morgenstern-Price (1965) | Superfície de ruptura qualquer |
| | Satisfaz o equilíbrio de momentos |
| | Satisfaz o equilíbrio de forças verticais e horizontais |

Fonte: Adaptado de Tonus (2009).

Para fins analíticos, os taludes de cada perfil também foram divididos em lado esquerdo e direito e foram definidas as coordenadas das superfícies de pesquisas do SLOPE/W (Tabela 2).

Tabela 2 – Configuração das superfícies de pesquisa no SLOPE/W.

| Dados | Intervalo | Coordenada | P1 esquerdo | P1 direito | P2 esquerdo | P2 direito | P3 esquerdo | P3 direito |
|---------|-----------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| Entrada | Esquerda | x (m) | 37,760 | 57,622 | 36,462 | 48,999 | 8,408 | 28,233 |
| | | y (m) | 752,543 | 752,939 | 754,946 | 755,048 | 748,958 | 751,470 |
| | Direita | x (m) | 41,049 | 62,192 | 42,211 | 50,868 | 11,100 | 31,351 |
| | | y (m) | 753,106 | 752,209 | 755,374 | 754,727 | 749,483 | 751,310 |
| Saída | Esquerda | x (m) | 7,368 | 67,567 | 0,000 | 59,448 | 0,000 | 48,463 |
| | | y (m) | 745,758 | 750,000 | 745,950 | 752,024 | 746,780 | 747,033 |

Tabela 2 – (Continuação) Configuração das superfícies de pesquisa no SLOPE/W.

| Dados | Intervalo | Coordenada | P1 esquerdo | P1 direito | P2 esquerdo | P2 direito | P3 esquerdo | P3 direito |
|---------|-----------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| Direita | | x (m) | 11,837 | 71,927 | 0,291 | 60,662 | 0,652 | 51,504 |
| | | y (m) | 746,233 | 749,663 | 746,032 | 751,768 | 746,949 | 746,612 |

Fonte: Autora (2020).

O tratamento do percolado do aterro é realizado em outra unidade da mesma empresa, situada em outra cidade de MG, já que o A1 não apresenta sistema para tal. Em razão das chuvas intensas de 2018, a equipe responsável pelo gerenciamento do aterro não pôde enviar todo o volume de líquido gerado para tratamento e optou por bombear parte do líquido para a célula encerrada, o que levou ao aumento da linha piezométrica desta. Por esse motivo, analisou-se também a variação da linha piezométrica da Fase 1 de fevereiro (3,28 m) para março (4,29 m), pré e pós bombeamento respectivamente, através do SLIDE/W, com o intuito de verificar os impactos desta decisão gerencial na sua estabilidade.

Na Tabela 3 foram reunidas informações a respeito do período de monitoramento, tipo de análise e softwares utilizados para modelagem do maciço neste trabalho.

Tabela 3 – Análises realizadas no presente trabalho.

| Período | Análise realizada | Software utilizado |
|---------------------------|---|--------------------|
| 2017 e 2018 | Variação da linha piezométrica e sua influência na estabilidade do aterro. | SLIDE/W |
| Fevereiro e março de 2018 | Influência do bombeamento de percolado da Fase 2 para a Fase 1 na estabilidade desta última | SLIDE/W |
| 2019 | Comparação da variação dos FS entre os softwares e os métodos de análise: | SLIDE/W e SLOPE/W |

Fonte: Autora (2020).

Para as simulações de estabilidade, foram adotados dados secundários, isto é, os parâmetros fornecidos como entrada para o modelo (Tabela 4) são peso específico (γ), ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c) referentes aos resíduos perigosos e ao solo de outro aterro do mesmo tipo, localizado também em Minas Gerais e operado pela mesma empresa responsável pelo A1. Isso ocorre para viabilizar o estudo, já que há uma grande dificuldade na determinação dos parâmetros de resistência desses materiais, principalmente por ainda não haver uma norma específica para tal. Além disso, os resíduos são bastante heterogêneos, demandando a realização de ensaios em vários pontos do aterro a fim de se obter amostras representativas,

o que torna o processo oneroso podendo colocar em risco a própria estabilidade do maciço, dependendo dos locais onde os furos são realizados.

Tabela 4 – Parâmetros utilizados nas análises de estabilidade.

| Material | γ (kN/m ³) | φ (°) | c (kPa) |
|-------------------|-------------------------------|---------------|---------|
| Resíduos Classe I | 9,3 | 28,5 | 5,0 |
| Solo de fundação | 18,0 | 32,0 | 10,0 |

Fonte: Autora (2020).

Nos softwares utilizados, há também a possibilidade de inserir o parâmetro de poropressão r_u , empregado em estudos de estabilidade em aterros sanitários como aqueles apresentados por Schuler (2010) e Borgatto (2006). Este parâmetro consiste na relação entre a pressão neutra e a tensão vertical e se mostra mais preciso que a linha piezométrica por considerar a drenagem interna do maciço (SUZUKI, 2012). Ele é obtido por meio de cálculo, explicitado pela Equação 1 (SCHULER, 2010), a partir dos dados oriundos das medições dos piezômetros de campo, e seus valores de referência ainda são escassos na literatura (SUZUKI, 2012).

$$r_u = \frac{u}{\sigma_v} = \frac{u}{\gamma \cdot h} , \quad (\text{Equação 1})$$

em que:

u: pressão neutra (kPa);

σ_v : tensão normal vertical (kPa);

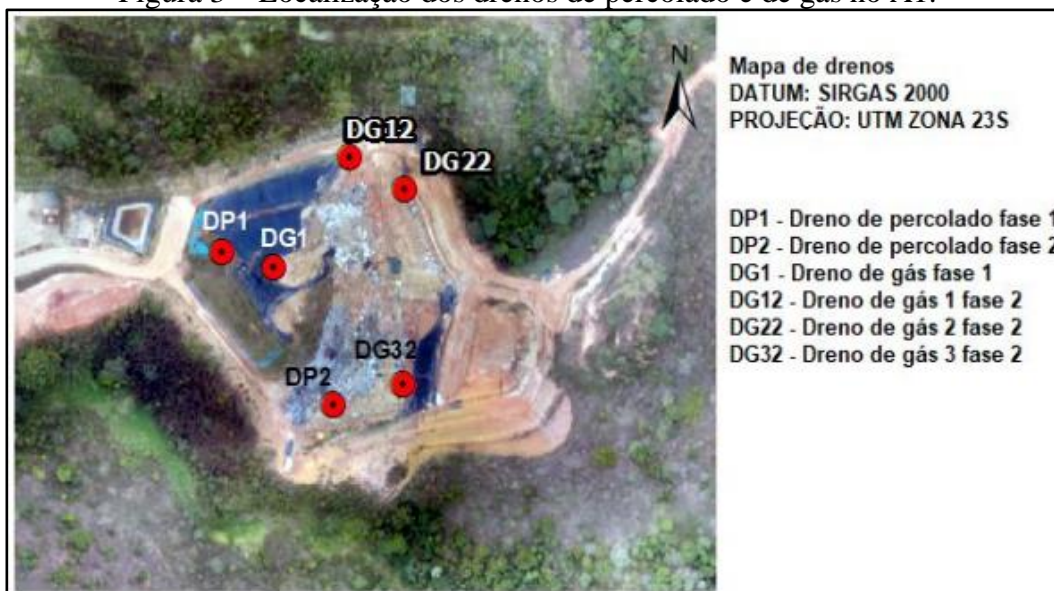
γ : peso específico dos resíduos (kN/m³);

h: altura do material sobrejacente (m)

Como o A1 não apresenta piezômetros instalados, não foi possível empregar esta metodologia, adotando-se, portanto, a linha piezométrica como poropressão para a análise de estabilidade. Para a realização das simulações, foram adotadas as alturas mais críticas medidas no período de forma a representar o pior cenário e prezar pela segurança.

As alturas estabelecidas para a linha piezométrica nas simulações da Fase 1 foram as mais críticas de cada ano, sendo 2,82 m em 2017 e 4,87 m em 2018. No ano de 2019, havia mais instrumentos de monitoramento (Figura 3), portanto, foram adotados valores máximos medidos pelo dreno mais próximo em relação ao perfil topográfico para a criação de uma linha piezométrica o mais representativa possível da realidade.

Figura 3 – Localização dos drenos de percolado e de gás no A1.



Fonte: Adaptado de Uai Soil, Relatório técnico UFJF, 2019.

As coordenadas da linha piezométrica de 2019 são apresentadas na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 – Coordenadas da linha piezométrica de 2019.

| Perfil 1 | | Perfil 2 | | Perfil 3 | | Perfil 4 | |
|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
| x (m) | y (m) | x (m) | y (m) | x (m) | y (m) | x (m) | y (m) |
| 0 | 744.55 | 0 | 744.55 | 0 | 744.55 | 20 | 743.05 |
| 60 | 742.75 | 50 | 742.75 | 20 | 742.75 | 60 | 743.05 |
| 90 | 743.05 | 85 | 743.05 | 50 | 743.05 | 70 | 741.95 |
| 110 | 741.52 | 110 | 742.18 | 80 | 741.95 | 120 | 741.95 |
| 140 | 741.52 | 120 | 741.93 | 90 | 741.95 | - | - |
| - | - | 130 | 739.86 | - | - | - | - |

Fonte: Autora (2020).

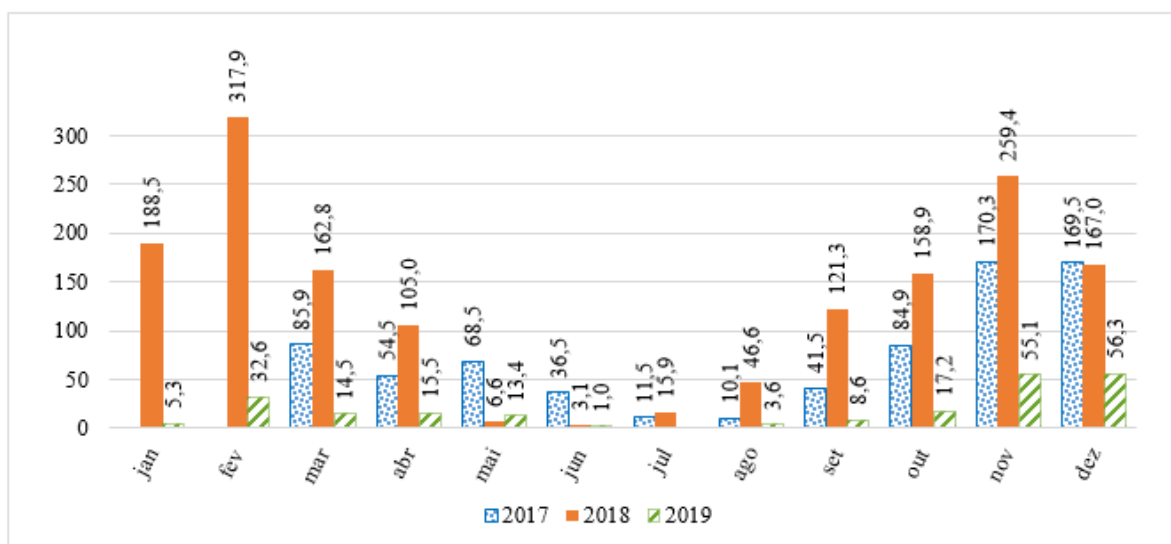
Os valores obtidos foram comparados com o fator de segurança mínimo estabelecido pela NBR 11682/2009 a fim de verificar sua conformidade. Considerando que o A1 apresenta baixo risco de perdas de vidas humanas e altos danos potenciais ambientais e materiais, essa norma estipula um FS mínimo de 1,4, então adotado como padrão. É importante ressaltar que a norma em questão prescreve os requisitos exigíveis para controle da estabilidade de taludes resultantes de cortes e aterros realizados em encostas cujo material é solo. No entanto, na falta de uma norma específica para estabilidade de taludes de aterros de resíduos, é usual que esta seja a referência adotada (FAGUNDES, 2019; REMEDIO, 2014; SCHULER, 2010).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ANÁLISE DE DADOS

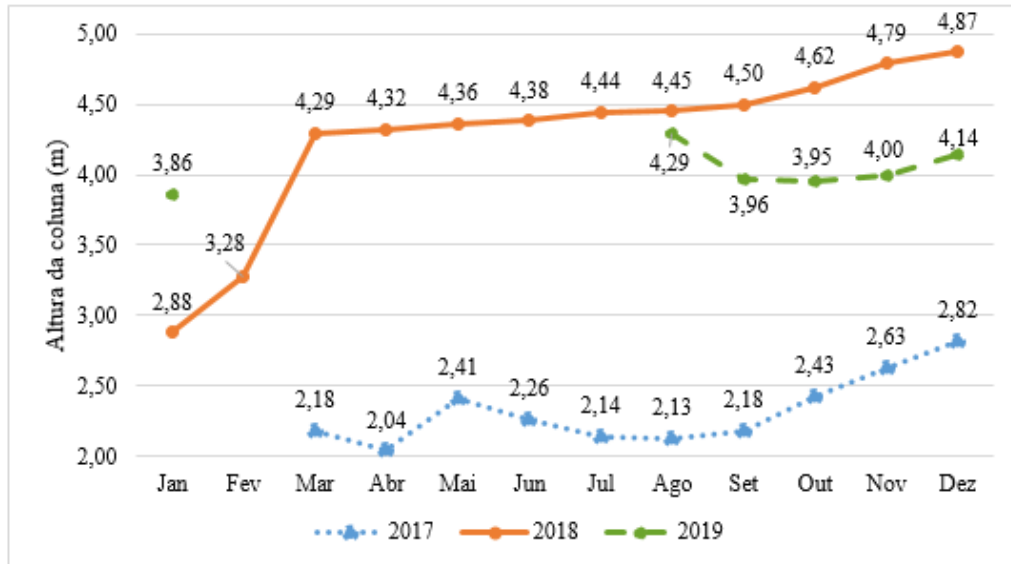
Observou-se a distribuição das chuvas ao longo dos três anos em estudo (Figura 5), a fim de relacioná-las com os registros de alturas do percolado no interior do maciço (Figura 6) e, como esperado, a altura de líquido foi maior no ano de maior precipitação (2018). Este fato pode ser observado nos meses mais chuvosos como novembro e dezembro de todos os anos. assim como no baixo nível de percolado no ano de 2017, que se apresentou um ano mais seco perante os demais (Figuras 4 e 5). Apesar de 2019 ter sido o ano mais seco do triênio, as alturas de percolado registradas foram intermediárias aos demais anos. Isso permite inferir que o volume oriundo de chuvas anteriores não foi destinado ao tratamento, gerando um acúmulo no interior do maciço, o que evidencia a influência direta do gerenciamento nos fatores intervenientes da estabilidade da estrutura.

Figura 4 – Pluviometria de 2017 a 2019.



Fonte: Autora (2020).

Figura 5 – Monitoramento do percolado na Fase 1 (2017-2019).



Fonte: Autora (2020).

3.2 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

3.2.1 Análise comparativa entre os anos de 2017 e 2018

Os resultados obtidos para o ano de 2017 e 2018 (Tabela 6) expressam diretamente a influência da altura de percolado no interior do maciço na estabilidade, uma vez que a geometria é a mesma e também as seções. O único fator variável é a pluviometria, que está diretamente relacionada à linha piezométrica. Como esperado, com o aumento da altura do percolado de 2,82 para 4,87 metros, todos os FS em 2018 foram menores que os FS obtidos para o ano de 2017.

Cerca de 78% dos valores de 2017 e 2018 se encontra acima do padrão de 1,4 estabelecido pela norma. Como esses resultados representam a situação mais crítica do ano (maior altura de líquido dentro do maciço), e considerando que alguns valores estão excessivamente conservadores por indicar ruptura inexistente ($FS < 1,000$), conclui-se que o aterro esteve com boa estabilidade no período e esse fato se deve provavelmente à natureza secundária dos dados.

Tabela 6 – Fatores de segurança obtidos nas simulações de 2017 e 2018 no SLIDE/W.

| Ano | Perfil | Bishop Simplificado | Janbu Simplificado | Morgenstern-Price |
|------|-------------|---------------------|--------------------|-------------------|
| 2017 | P1 esquerdo | 2,127 | 1,964 | 2,124 |
| | P1 direito | 1,305 | 1,232 | 1,303 |
| | P2 esquerdo | 2,002 | 1,846 | 1,998 |

Tabela 6 – (Continuação) Fatores de segurança obtidos nas simulações de 2017 e 2018 no SLIDE/W.

| Ano | Perfil | Bishop Simplificado | Janbu Simplificado | Morgenstern-Price |
|------|-------------|---------------------|--------------------|-------------------|
| 2017 | P2 direito | 1,405 | 1,301 | 1,408 |
| | P3 esquerdo | 2,647 | 2,285 | 2,645 |
| | P3 direito | 2,170 | 2,030 | 2,161 |
| | P4 esquerdo | 2,812 | 2,626 | 2,811 |
| | P4 direito | 2,501 | 2,326 | 2,495 |
| | P5 esquerdo | 2,507 | 2,305 | 2,503 |
| | P5 direito | 1,871 | 1,739 | 1,867 |
| 2018 | P1 esquerdo | 1,609 | 1,455 | 1,617 |
| | P1 direito | 0,917 | 0,903 | 0,921 |
| | P2 esquerdo | 2,002 | 1,846 | 1,998 |
| | P2 direito | 1,069 | 0,996 | 1,079 |
| | P3 esquerdo | 2,060 | 1,759 | 2,065 |
| | P3 direito | 2,170 | 2,030 | 2,161 |
| | P4 esquerdo | 2,654 | 2,221 | 2,654 |
| | P4 direito | 2,502 | 2,248 | 2,497 |
| | P5 esquerdo | 1,201 | 1,130 | 1,213 |
| | P5 direito | 1,871 | 1,739 | 1,867 |

Fonte: Autora (2020).

3.2.2 Análise comparativa entre fevereiro e março de 2018

O bombeamento de percolado para a Fase 1 causou grande acúmulo de lixiviado na. Esse volume excedente foi então encerrada como forma de solução imediata, elevando o nível piezométrico, gerando uma diferença final de 1,01 m em relação ao mês anterior.

Analisou-se a estabilidade da Fase 1 nos meses de fevereiro e março, anterior e posterior ao bombeamento respectivamente, a fim de verificar a influência da elevação da linha piezométrica de 3,28 m para 4,29 m na segurança dos taludes.

Os valores de FS obtidos foram majoritariamente menores para o mês de março, como esperado, devido à linha piezométrica mais alta, alcançando valores preocupantes em alguns taludes. Isso pode ser observado no caso do lado direito dos perfis 1 e 2 (Tabela 7) que se aproximam de 1, que é o limite teórico de estabilidade e já estavam abaixo de 1,4. O valor de

Janbu para o perfil 1 lado direito (0,995) está muito conservador, uma vez que abaixo de 1 indica ruptura do maciço e não houve deslizamento no local.

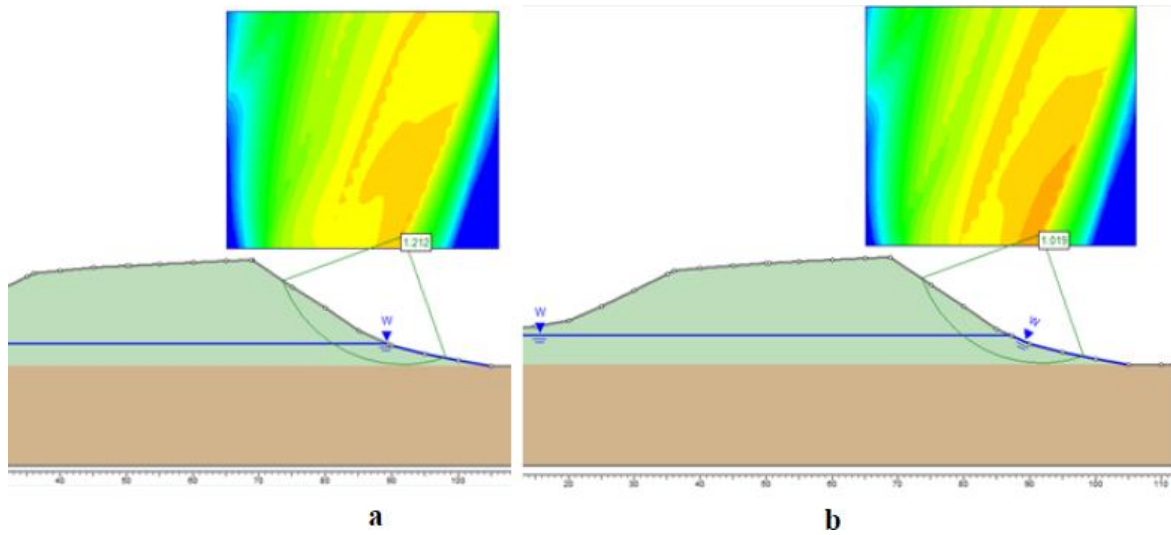
Tabela 7 – Resultados referentes ao bombeamento de percolado em 2018.

| | Mês | FS Slide/W | | | Redução FS (%) | | |
|-------------|-----------|------------|-------|-------|----------------|-------|-------|
| | | Bishop | Janbu | MP | Bishop | Janbu | MP |
| P1 esquerdo | Fevereiro | 2,127 | 1,905 | 2,123 | 13,59 | 13,96 | 13,24 |
| | Março | 1,838 | 1,639 | 1,842 | | | |
| P1 direito | Fevereiro | 1,212 | 1,155 | 1,219 | 15,92 | 13,85 | 16,16 |
| | Março | 1,019 | 0,995 | 1,022 | | | |
| P2 esquerdo | Fevereiro | 2,004 | 1,849 | 2,000 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Março | 2,004 | 1,849 | 2,000 | | | |
| P2 direito | Fevereiro | 1,319 | 1,228 | 1,323 | 13,04 | 13,36 | 12,77 |
| | Março | 1,147 | 1,064 | 1,154 | | | |
| P3 esquerdo | Fevereiro | 2,567 | 2,187 | 2,566 | 11,80 | 11,80 | 11,69 |
| | Março | 2,264 | 1,929 | 2,266 | | | |
| P3 direito | Fevereiro | 2,171 | 2,029 | 2,165 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Março | 2,171 | 2,029 | 2,165 | | | |
| P4 esquerdo | Fevereiro | 2,813 | 2,598 | 2,812 | 0,00 | 8,73 | 0,00 |
| | Março | 2,813 | 2,373 | 2,812 | | | |
| P4 direito | Fevereiro | 2,502 | 2,327 | 2,496 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Março | 2,502 | 2,327 | 2,496 | | | |
| P5 esquerdo | Fevereiro | 2,161 | 1,927 | 2,160 | 23,55 | 21,12 | 23,29 |
| | Março | 1,652 | 1,520 | 1,657 | | | |
| P5 direito | Fevereiro | 1,871 | 1,739 | 1,865 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Março | 1,871 | 1,739 | 1,865 | | | |

Fonte: Autora (2020).

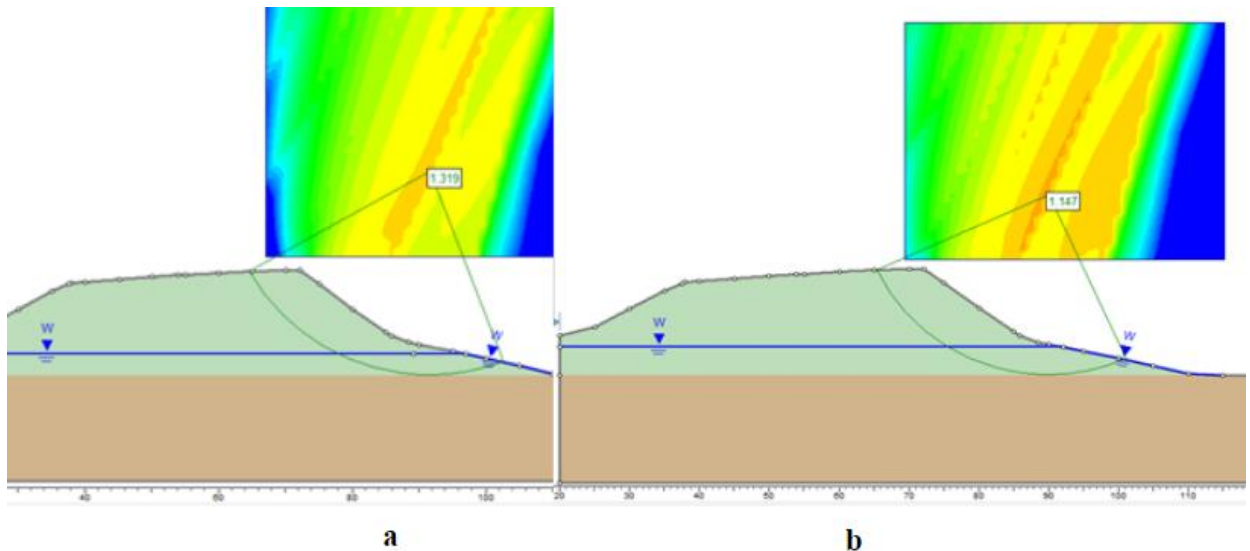
Na elevação da linha piezométrica no lado direito do perfil 1, esta continua alcançando a superfície do talude, como no estado anterior ao bombeamento (Figura 6 a), porém em uma altura maior, o que justifica a diminuição do FS ilustrado na Figura 6 b. O mesmo acontece para o lado direito do perfil 2 (Figura 7 a e b), apresentando reduções do fator de segurança de 12,77% a 16,16% em relação a fevereiro nesses perfis.

Figura 6 – Comparação pré e pós bombeamento no Perfil 1 lado direito (Bishop simplificado). **a.** Fevereiro (FS=1,212). **b.** Março (FS=1,019).



Fonte: Autora (2020).

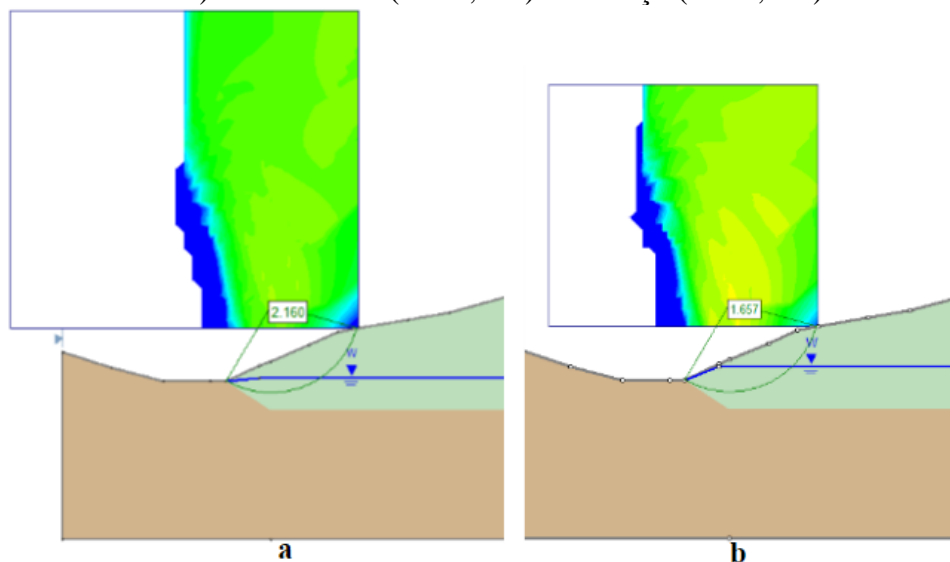
Figura 7 – Comparação pré e pós bombeamento no Perfil 2 lado direito (Bishop simplificado). **a.** Fevereiro (FS=1,319). **b.** Março (FS=1,147).



Fonte: Autora (2020).

Esse mesmo comportamento é observado para o lado esquerdo do perfil 5 (Figura 8 a e b). No entanto, há um efeito sinérgico da elevação da linha piezométrica com a maior inclinação deste talude do que a dos perfis 1 e 2 lado direito, o que torna essa redução ainda maior, entre 21,12% e 23,55%.

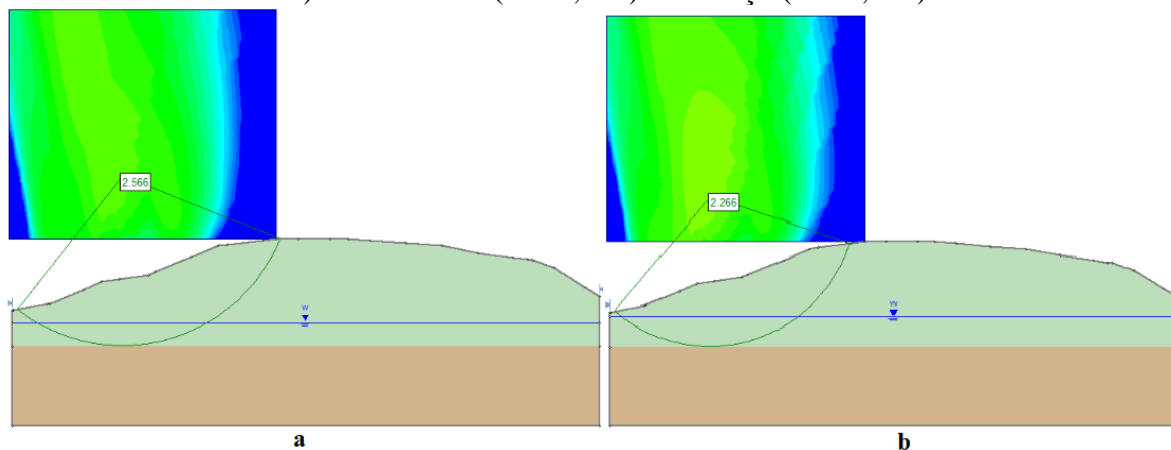
Figura 8 – Comparação pré e pós bombeamento no Perfil 5 lado esquerdo (Morgenstern-Price). **a.** Fevereiro (FS=2,160). **b.** Março (FS=1,657).



Fonte: Autora (2020).

No perfil 3 lado esquerdo (Figura 9 a e b), o líquido se aproxima da superfície do terreno e gera FS aproximadamente 12% menor para todos os métodos de análise.

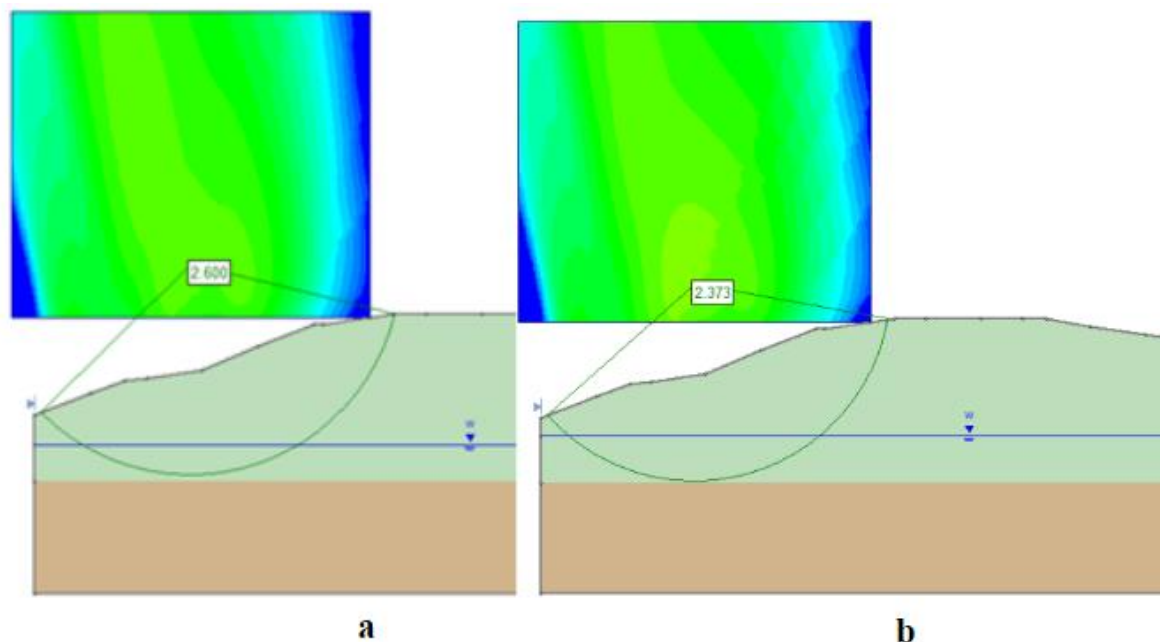
Figura 9 – Comparação pré e pós bombeamento no Perfil 3 lado esquerdo (Morgenstern-Price). **a.** Fevereiro (FS=2,566). **b.** Março (FS=2,266).



Fonte: Autora (2020).

Nos demais perfis, a variação foi nula, indicando que a sensibilidade dos métodos não foi capaz de detectar o aumento de 1,01 m no nível piezométrico quando a camada de resíduos sobrejacente é grande. A única exceção foi o método de Janbu Simplificado no lado esquerdo do perfil 4 (Figura 10 a e b), levando à hipótese de maior sensibilidade deste método em relação à proximidade com a superfície, corroborando seus resultados sempre mais conservadores.

Figura 10 – Comparação pré e pós bombeamento no Perfil 4 lado esquerdo (Janbu simplificado). **a.** Fevereiro (FS=2,600). **b.** Março (FS=2,373).



Fonte: Autora (2020).

3.2.3 Análise do ano de 2019

Já em 2019, os resultados encontrados para os FS foram, em geral, ainda mais altos do que nos anos anteriores, conforme mostra a Tabela 8.

Tabela 8 – Fatores de segurança obtidos para as seções de 2019.

| Software | Talude/método analítico | P1 esquerdo | P1 direito | P2 esquerdo | P2 direito | P3 esquerdo | P3 direito |
|----------|-------------------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| Slope/W | Bishop simplificado | 3,320 | 2,828 | 2,958 | 3,683 | 4,509 | 3,775 |
| | Janbu simplificado | 3,164 | 2,581 | 2,608 | 3,368 | 4,096 | 3,383 |
| | Morgenstern-Price | 3,352 | 2,811 | 2,958 | 3,678 | 4,505 | 3,772 |
| Slide/W | Bishop simplificado | 2,729 | 3,069 | 2,966 | 3,650 | 4,489 | 3,754 |
| | Janbu simplificado | 2,466 | 2,707 | 2,518 | 3,340 | 4,091 | 3,316 |
| | Morgenstern-Price | 2,730 | 3,065 | 2,966 | 3,648 | 4,486 | 3,750 |

Fonte: Autora (2020).

Analisando os valores, o menor FS em 2019 foi de 2,466, sugerindo melhora no gerenciamento, o que foi confirmado através da visita in loco em dezembro do mesmo ano, em que foram verificadas melhorias no sistema de drenagem superficial após orientações de relatórios de monitoramento geotécnico anteriores como sobreposição de rasgos com novas mantas e desobstrução da canaleta no pé do talude.

A variação entre os softwares (Tabela 9) foi maior para o perfil 1 esquerdo, em que o SLIDE/W apresentou FS 22,78% menores para Morgenstern-Price, 28,30% para Janbu Simplificado e 21,66% para Bishop Simplificado. Esse fato sugere provável discrepância entre as diferentes superfícies de pesquisa, uma vez que ocorre para todos os métodos de análise nesse perfil e o Auto Grid é mais confiável em relação a indicar a superfície de ruptura mais críticas, pois possibilita ajuste da grade. A diferença média verificada entre os softwares foi baixa, sendo menor que 3,00% para Bishop e Morgenstern-Price e 5,03% menor para Janbu.

Tabela 9 – Percentuais de variação do SLIDE/W em relação ao SLOPE/W.

| Método | P1 esquerdo | P1 direito | P2 esquerdo | P2 direito | P3 esquerdo | P3 direito | Variação média (%)* |
|---------------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|------------------------|
| Bishop simplificado | -21,66 | 7,85 | 0,27 | -0,90 | -0,45 | -0,56 | -2,57 |
| Janbu simplificado | -28,30 | 4,65 | -3,57 | -0,84 | -0,12 | -2,02 | -5,03 |
| Morgenstern-Price | -22,78 | 8,29 | 0,27 | -0,82 | -0,42 | -0,59 | -2,68 |

Fonte: Autora (2020).

Observando os resultados obtidos nos dois softwares utilizados, o método Janbu Simplificado se mostrou o mais conservador, apresentando valores de FS mais baixos que os demais. Ainda que essa diferença seja a favor da segurança, quando os resultados destoam muito da realidade, sua utilização pode inviabilizar economicamente projetos e obras.

As soluções encontradas através do Bishop Simplificado, método de ruptura circular que não satisfaz todas as equações de equilíbrio, foram muito semelhantes aos FS obtidos pelo método Morgenstern-Price, considerado mais rigoroso por admitir qualquer superfície de ruptura e atender a todas as condições de equilíbrio estático.

Trabalhos anteriores também utilizaram esses métodos para análises e apresentaram resultados convergentes. Menezes (2012) avaliou a estabilidade de um talude de mina de ferro e constatou que, no geral, o método Bishop Simplificado apresentou valores de FS superiores ao Janbu. Fernandes e Silva Filho (2010) desenvolveram planilhas no software Excel para análise da estabilidade de taludes com base nos métodos de Bishop, Fellenius e Janbu e encontraram FS maiores para o método de Bishop do que para Janbu. Tonus (2009) comparou os métodos de Fellenius, Janbu, Bishop, Morgenstern-Price e Spencer, simulando uma situação real no SLOPE/W, e verificou que o método de Bishop fornece resultados semelhantes aos dos métodos rigorosos em qualquer situação e não só em solos homogêneos.

A diferença percebida entre os resultados dos dois programas pode ser explicada tendo em vista as distintas formas adotadas para a seleção da superfície de pesquisa. No software SLOPE/W, o modelo foi alimentado com dados de Entrada e Saída, que, além de limitarem as extremidades da cunha de ruptura aos intervalos, não permitem saber se o resultado é o mais crítico como no *grid*. Isso porque quando o FS aparece em cima de uma das bordas da grade, sabe-se que aquele valor pode não ser o menor, informação que não se pode extrair do SLOPE/W nas condições configuradas para este trabalho.

3.3 Índice de Qualidade no Sistema da Gestão Ambiental em Aterros Industriais

Por fim, considerou-se um estudo anterior de Fonseca, Righi e Castro (2019) sobre a aplicação do Índice de Qualidade no Sistema da Gestão Ambiental em Aterros Industriais (IQSI) no A1 referente às condições de 2018. No estudo, os autores empregaram um índice específico para aterros de resíduos industriais, que avalia critérios de localização, infraestrutura, operação e gestão com base nas legislações vigentes, os quais refletem a qualidade da operação do aterro, o atendimento a normas e a garantia de segurança ambiental e da saúde humana.

O resultado para o A1 foi 8,83 de um total de 10, sendo classificado como tendo “Condições adequadas” dentro do intervalo 8,01-9,00, abaixo apenas da classe “Condições ambientais” devido à ausência de alguns testes no laboratório, tratamentos para alguns resíduos específicos, que não apresentaram demanda até o momento, e principalmente pela drenagem de águas pluviais insuficiente, apesar de existente, algo que vem sendo melhorado, conforme apresentado no item 3.2. Visto que determinadas exigências do IQSI não são aplicáveis à tipologia do A1, uma vez que o índice foi elaborado para uso amplo em quaisquer aterros industriais, conclui-se que o gerenciamento é bastante satisfatório, principalmente no que diz respeito à operação, que contemplou 98,41% do total de pontos.

4. CONCLUSÕES

Apesar das fragilidades que os estudos sobre aterros sanitários apresentam como a deficiência de dados primários para entrada no modelo, devido à dificuldade técnica de determinação dos parâmetros de resistência de forma representativa, e o software ser desenvolvido para solos, é possível extrair informações relevantes que contribuem para a melhoria contínua das obras de aterro.

Como esperado, a maior precipitação em 2018 implicou em maior infiltração de água no maciço, elevando a produção de lixiviado e sua altura, resultando em maior instabilidade do aterro em relação a 2017. Dessa forma, os sistemas de drenagem superficial e interna se mostram essenciais na função de reduzir as tensões atuantes no maciço.

As análises sobre o evento do bombeamento de lixiviado para a Fase 1 evidenciaram como uma decisão operacional pode impactar na estabilidade do aterro, até mesmo de um mês para o outro. Assim, reforça-se a contribuição do monitoramento geotécnico como ferramenta auxiliar no gerenciamento da instalação de forma a garantir a saúde humana e qualidade ambiental.

Em termos de software, observou-se melhor usabilidade do programa SLIDE/W, especialmente devido ao método de superfície de pesquisa Auto Grid, que possui manipulação mais rápida que o SLOPE/W, em especial quando são necessárias alterações para identificação do FS mais crítico. O segundo se mostrou mais didático por estabelecer inicialmente os intervalos das superfícies de pesquisa, demandar repetição dos passos de entrada dos dados toda vez que se altera a superfície de pesquisa e por ser um software de livre acesso. No entanto, é pouco eficiente no caso de numerosas simulações, uma vez que permite a seleção de apenas um método analítico por simulação, enquanto o SLIDE/W permite calcular mais de um método e alternar entre os resultados de cada um facilmente. Além disso, o SLOPE/W restringe a cunha da superfície de ruptura aos intervalos da superfície de pesquisa e, caso haja alguma mais crítica entre essas extremidades, não será exibida como é feito no SLIDE/W.

A partir das exposições do trabalho, é possível concluir a importância do bom gerenciamento para um aterro de resíduos, especialmente Classe I, inclusive na sua estabilidade geotécnica, atuando na prevenção de acidentes. Apesar de não ser uma exigência legal, mostra-se vantajosa a elaboração de um Plano de Ações Emergenciais (PAE) que identifique a área de influência do empreendimento, possíveis impactos ambientais e medidas emergenciais a serem adotadas pelos operadores e pela sociedade vizinha em caso de deslizamentos. Com isso, poupam-se vidas, danos ambientais, sociais e gastos financeiros com medidas corretivas e compensações ambientais.

Recomenda-se também, sempre que possível, a utilização dos parâmetros de resistência obtidos através de ensaios em vários pontos do próprio aterro a fim de obter resultados mais fidedignos, assim como o emprego do parâmetro de poropressão r_u .

REFERÊNCIAS

ABNT (1987). NBR 10157: **Aterros de resíduos perigosos – Critérios para projeto, construção e operação**. Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro;

ABNT (2004). NBR 10004: **Resíduos sólidos - classificação**. Rio de Janeiro;

ABNT (2009). NBR 11682: **Estabilidade de encostas**. Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro;

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. 2017. Disponível em: http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf. Acesso em jun. 2020;

BALDÉ, C. P., FORTI, V., GRAY, V., KUEHR, R., STEGMANN, P. **The Global E-waste Monitor 2017: Quantities, Flows, and Resources**. Disponível em: https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/Global-E-waste_Monitor_2017__electronic_single_pages_.pdf. Acesso em jun. 2020;

BORGATTO, A. V. A. **Estudo do efeito fibra e da morfologia na estabilidade de aterros de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação (Mestrado), Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio de Janeiro. 157 f. Rio de Janeiro, 2006;

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Lixo: um grande problema do mundo moderno**. Disponível em: https://www.mma.gov.br/estruturas/sedr_proecotur/publicacao/140_publicacao09062009031109.pdf. Acesso em 17 jun. 2020;

FAGUNDES, Y. L. **Análise dos parâmetros de resistência dos resíduos sólidos em geometria de aterro sanitário em Minas Gerais**. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil – Universidade Federal de Juiz de Fora. 79 p. Juiz de Fora, 2019.

FELDHAUS, C. R. **Influência de parâmetros de entrada em modelos de simulação de aterros de resíduos**. 2019. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina - Udesc, Joinville, 2019;

FERNANDES, M. O., SILVA FILHO, F. C. **Análise de estabilidade de Taludes pelos métodos de Fellenius, Bishop e Janbu**. In: Revista Tecnologia, v. 19, n. 1, 2010.

Disponível em: <http://ojs.unifor.br/index.php/tec/article/view/1187/738>. Acesso em 15 de jul. 2020;

FONSECA, M. M., RIGHI, J. A., CASTRO, S. R. **Avaliação do Gerenciamento de um Aterro de Resíduos Industriais Perigosos a partir da Aplicação de um Índice de Qualidade**. REGEO/Geossintéticos 2019, São Carlos/SP, Brasil. Anais p. 713-721;

GEOSLOPE. **Slope/W**. Disponível em: <https://www.geoslope.com/products/slope-w>. Acesso em 15 jul. 2020;

KAMIJI, T. S. M. M., DE OLIVEIRA, F. J. P. **Reflexões a Respeito de Rupturas em Aterros Sanitários Brasileiros**. REGEO/Geossintéticos 2019, São Carlos/SP, Brasil. Anais, vol. 1, p. 469-475;

LEI No 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em jun. 2020;

MENEZES, I. P. **Estudos de estabilidade de taludes da mina a céu aberto São Luís em Catas Altas/MG combinando técnicas de geoprocessamento e métodos usuais de investigação e análise geológico-geotécnicas**. 2012. 139 p. + anexos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-08112012-111427/pt-br.php>. Acesso em 28 ago. 2020;

MONTEIRO, A. E. **Índice de qualidade de aterros industriais - IQRI**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006;

REMÉDIO, F. H. **análise de estabilidade de taludes de aterro de resíduos urbanos utilizando parâmetros geotécnicos de propostas bibliográficas e correlações com Nspt**. Dissertação (Mestrado). 131 p. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, SP, 2014.

RIBEIRO, A. G. C. **Determinação de Parâmetros de Resistência de Resíduos Sólidos Urbanos por Meio de Retroanálises de Testes em Laboratório**. 2007. 100 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/3850/texto%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 15 jul. 2020;

Relatório técnico UFJF – Estabilidade de aterro classe I. Anos: 2017 a 2019 (acervo pessoal);

RIGHI, J. A. **Estabilidade e monitoramento de aterros sanitários - Aula 6.** Juiz de Fora, MG. 2019;

ROCSCIENCE. **Slide2.** Disponível em: <https://www.rocscience.com/software/slide2>. Acesso em: 15 jul. 2020;

SCHULER, A. R. **Análise do comportamento de um aterro municipal de resíduos sólidos urbanos instrumentado.** 152 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE. 2010;

SUZUKI, D. K. **Verticalização de aterros sanitários por meio de reforço com geogrelhas e diques periféricos alteados pelo método de montante.** 165 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2012;

TONUS, B. P. A. **Estabilidade de Taludes - Avaliação dos Métodos de Equilíbrio Limite Aplicados a uma Encosta Coluvionar e Residual da Serra do Mar Paranaense.** 2009. 147 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Disponível em: https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/19152/Dissertacao_Bianca.pdf;jsessionid=481F2C00E8AD5C572F03D2D451A0CCEB?sequence=1. Acesso em 15 jul. 2020.