

Avaliação dos Fatores de Segurança de Pilhas de Rejeitos a partir de análises de estabilidade 2D e 3D

Fernanda Gavioli

Eng. Geotécnica, Vale S.A, São Paulo, BR, fernanda.gavioli@vale.com

Ana Luisa Halabi

Eng. Geotécnica, Geocoba, Belo Horizonte, BR, E-mail

Miguel Villalobos

Eng. Geotécnico, Geocoba, Belo Horizonte, BR, E-mail

Fernando Sgavioli

Eng. Civil Geotécnico, Vale S.A, Belo Horizonte, BR, fernando.sgavioli@vale.com

RESUMO: As análises de estabilidade de taludes são em geral realizadas por métodos determinísticos e avaliadas por meio de um fator de segurança. Situações corriqueiras, embora se saiba que os parâmetros geotécnicos podem apresentar grande dispersão devido a sua variabilidade mineralógica, nessas análises determinísticas eles são considerados fixos e conhecidos. Nos estudos geotécnicos e geológicos, principalmente quando se analisa a segurança de taludes, é importante ter-se em mente a grande distinção de características que um solo pode apresentar, visto a alta variabilidade dos parâmetros característicos do solo ou do material que está sendo trabalhado (na mineração por exemplo estéril e rejeito), inclusive em uma camada relativamente homogênea. Dessa forma, faz-se cada vez mais necessária a utilização de métodos que garantam a confiabilidade das estruturas geotécnicas. É o caso dos métodos estatísticos que buscam, através da probabilidade, incorporar as incertezas relacionadas, complementando as análises determinísticas já existentes. Este artigo apresenta a avaliação de uma pilha seca de rejeitos tridimensional simplificada com fundação de resistência infinita. Existem dois métodos probabilísticos frequentemente utilizados no meio geotécnico: Primeira Ordem e Segundo Momento (FOSM), Monte Carlo (MC) e Hipercubo Latino (LHS). Neste trabalho são empregados os três últimos citados anteriormente. As variáveis utilizadas foram a coesão, ângulo de atrito, peso específico do rejeito compactado e, para análise não drenada, o parâmetro ru . Verificou-se que o índice de confiabilidade e a probabilidade de ruína são influenciados pelos métodos de análise de estabilidade adotados. Também se verificou que o método de MC apresenta diversas vantagens perante o método FOSM, dois métodos probabilísticos. É importante ressaltar que a análise 3D pode apresentar erros de convergência dependendo do método utilizado e da análise realizada, drenada ou não drenada, sendo necessária avaliação antes da utilização da Simulação de Monte Carlo.

PALAVRAS-CHAVE: Análises de Estabilidade, Métodos Estatísticos, FOSM, Monte Carlos, LHS.

ABSTRACT: Slope stability analyzes are generally carried out using deterministic methods and evaluated using a safety factor. Common situations, although it is known that geotechnical parameters can present great dispersion due to their mineralogical variability, in these deterministic analyzes they are considered fixed and known. In geotechnical and geological studies, especially when analyzing the safety of slopes, it is important to keep in mind the great distinction of characteristics that a soil can present, given the high variability of the characteristic parameters of the soil or the material being worked (in mining for example sterile and rejected), including in a relatively homogeneous layer. Therefore, it is increasingly necessary to use methods that guarantee the reliability of geotechnical structures. This is the case of statistical methods that seek, through

probability, to incorporate related uncertainties, complementing existing deterministic analyses. This article presents the evaluation of a simplified three-dimensional dry tailings pile with an infinite strength foundation. There are two probabilistic methods frequently used in geotechnical circles: First Order and Second Moment (FOSM), Monte Carlo (MC) and Latin Hypercube (LHS). In this work, the last three mentioned above were used. The variables used were cohesion, friction angle, specific weight of compacted waste and, for undrained analysis, the ru parameter. It was found that the reliability index and the probability of ruin are influenced by stability analysis methods. It is also clear that the MC method has several advantages over the FOSM method, two probabilistic methods. It is important to highlight that the 3D analysis may present convergence errors depending on the method used and the analysis performed, drained or undrained, requiring evaluation before using the Monte Carlo Simulation.

KEYWORDS: Stability Analysis, Statistical Methods, FOSM, Monte Carlo, LHS.

1 INTRODUÇÃO

Mediante ao histórico de acidentes geotécnicos atrelados a barragens de mineração, com graves consequências em vidas humanas e danos ambientais, o licenciamento de novas estruturas com essa finalidade tem se tornado cada vez mais difícil e demorado. Dessa maneira, o setor minerário foi obrigado a buscar novas alternativas para disposição de resíduos, incluindo a disposição a seco de resíduos filtrados (BARBOSA, 2022).

Mesmo com diversos estudos na área e a incessante busca por conhecimento e desenvolvimento da qualidade do diagnóstico e obtenção dos dados, ainda são observados casos em que há a existência de riscos sociais e econômicos, colocando vida humana em perigo.

Seguindo esse pressuposto, se faz cada vez mais necessária a utilização de métodos que garantam a confiabilidade das estruturas geotécnicas. Assim, além de uma abordagem clássica bidimensional usada para analisar a estabilidade convencional de pilhas de resíduos, é importante ver essas estruturas em três dimensões para compreender a interação da geometria 3D, considerando todas as forças internas e como se dá a interação entre elas, impactando diretamente em sua segurança geotécnica.

A abordagem probabilística é uma técnica capaz de minimizar as incertezas das análises geotécnicas de estabilidade, e de complementar as análises determinísticas. Quando análises probabilísticas são aplicadas a estudos de estabilidade de taludes, o FS deixa de ser um valor médio e passa a ser entendido como uma função. Assim, passa-se a ter FS como uma variável aleatória dependente de outras variáveis chamadas independentes, as quais normalmente são os parâmetros variáveis ao longo do solo como: coesão efetiva (c'), ângulo de atrito efetivo (Φ'), poropressão (u), peso específico seco (γ_d), peso específico saturado (γ_{sat}), e resistência não drenada (S_u).

Diferentes métodos podem ser utilizados para determinar a probabilidade de falha de uma estrutura, como métodos probabilísticos de Monte Carlo (MC), Hipercubo Latino e Método de Superfície de Resposta incluído nos softwares Slide 2 e Slide 3 (ROCSCIENCE, 2023), FOSM, MCS e o LHS.

O método FOSM é desenvolvido por uma expansão da série de Taylor, para a determinação da distribuição de probabilidade de uma função com um certo número de variáveis aleatórias. O método de MC ganhou significância com o desenvolvimento de computadores para a automação de dados. Para aplicação do método, é necessário conhecer as funções de densidade de probabilidade das variáveis aleatórias. Faz-se uma série de análises, por um método determinístico qualquer, sendo que em cada uma delas atribui-se um valor a cada variável aleatória a partir de sua distribuição de probabilidade. Após um grande número de simulações, é construído um histograma com todos os dados armazenados, obtendo-se uma função de distribuição de probabilidade do fator de segurança e como consequência a probabilidade de ruína.

Atualmente estão sendo abordados na literatura técnica, critérios para o gerenciamento do risco em função da probabilidade de ruína ou índice de confiabilidade e das consequências (vidas humanas, construções afetadas, prejuízos, etc.) para diferentes tipos de obras. Na Tabela 01, apresentam-se, de acordo com o *Corps of Engineers* (1997), níveis de desempenho esperados em função da probabilidade de ruína e do índice de confiabilidade. Verifica-se que um nível médio de desempenho corresponde nessa tabela a uma probabilidade de ruína de 10^{-3} .

Tabela 01 – Corps of Enginners (1997)

Nível	Índice de Confiabilidade	Probabilidade de ruína
Alto	5	3×10^{-7}
Bom	4	3×10^{-5}
Acima da média	3	0,0013
Abaixo da média	4,5	0,006
Pobre	2	0,023
Não satisfatório	1,5	0,07
Perigoso	1	0,16

Este trabalho baseia-se nas interpretações de análises aplicadas a uma pilha de mineração por métodos: determinísticos e probabilísticos. A partir das análises e dados obtidos, objetivou-se:

- Estudar a influência do método de equilíbrio limite e sua influência na contribuição relativa dos parâmetros do solo na estabilidade do talude utilizando-se o método FOSM;
- Avaliar a influência do método determinístico (SPENCER) nos resultados das análises probabilísticas (FOSM e MONTE CARLO);
- Comparar resultados de análises probabilísticas realizadas por métodos distintos (FOSM e MONTE CARLO), indicados na literatura.

Para execução das análises, foram utilizados o programa RS03, versão 3.017, do pacote Rocscience.

2 METODOLOGIA

Para as análises de estabilidade, foram realizadas primeiramente análises tridimensionais de equilíbrio limite para determinação de um fator de segurança relativo à ruptura 3D, no software Slide 3D v 3.017. A seguir foi definida a seção bidimensional para avaliação do fator de segurança 2D da estrutura no software Slide 2D v 9.017. A geometria da pilha seca simplificada utilizada é apresentada na Figura 01.

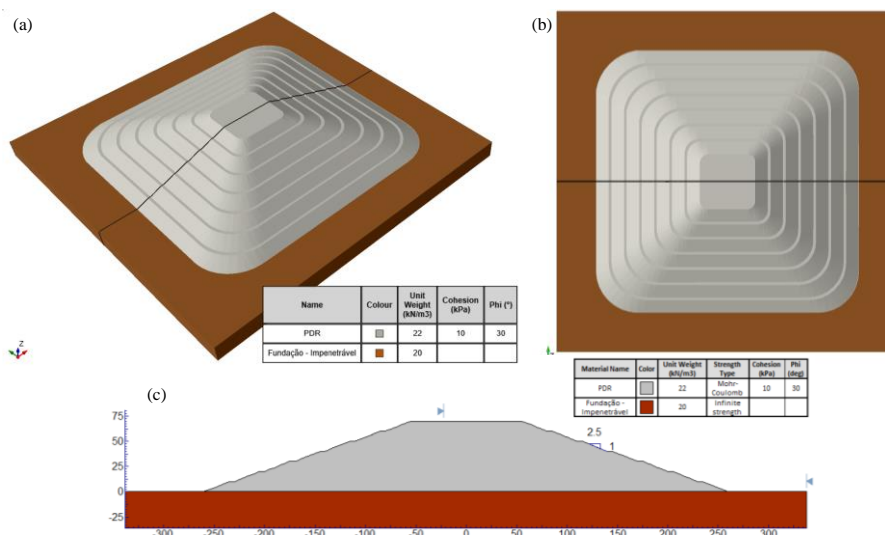


Figura 1. Geometria do Dry Stack simplificado utilizado.

Em seguida foi realizada uma análise probabilística nesta superfície, utilizando o método FOSM, a fim de avaliar as variáveis de maior importância para a variação do fator de segurança, e comparar a importância dessas variáveis nas diferentes geometrias bidimensionais e tridimensionais.

Neste estudo de caso, os parâmetros de resistência de coesão efetiva, ângulo de atrito e peso específico dos rejeitos da PDR foram considerados como principais variáveis de interesse. Dada a limitação dos dados para estimar a média e o desvio padrão das variáveis, os parâmetros foram adotados como valores médios. Os coeficientes de variação, correspondentes aos parâmetros de coesão e ângulo de atrito foram utilizados de acordo com a literatura devido baixa variabilidade dos parâmetros analisados.

Tabela 02 – Covariância típica dos parâmetros geotécnicos (SILVA, 2015)

	Valor médio dos Rejeitos	Coefficiente de Variação (%) Adotado	Desvio Padrão Adotado	Coefficiente de Variação (%) Recomendado	Intervalo
f'	30°	10	3°	10	04 a 20
c'	10 kPa	40	4 kPa	40	20 a 80
g_{nat}	22 kN/m ³	03	6,5 kN/m ³	03	02 a 08

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados da análise de estabilidade da pilha seca de rejeitos idealizada. A análise é apresentada para condições drenadas, tanto para as geometrias 2D e 3D. A condição não drenada é uma condição temporária, que ocorre devido a eventos desencadeadores. Este trabalho não contempla uma probabilidade de falha devido a condições não drenadas.

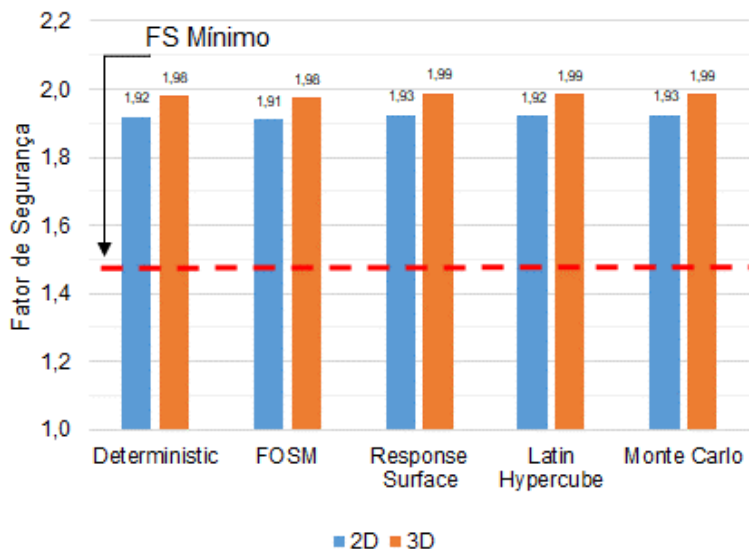


Figura 2. Fator médio de segurança dos diferentes métodos de superfície para análise 2D e 3D.

A Figura 2 apresenta o fator de segurança da análise determinística comparado ao fator de segurança médio (FoS) dos diferentes métodos probabilísticos, tanto para análise 2D quanto para 3D. É importante ressaltar que foi adotada uma geometria homogênea simplificada e a distribuição normal das variáveis de entrada.

A Figura 3 apresenta a influência dos parâmetros de resistência para análises 2D e 3D obtidas pelo método FOSM. A porcentagem de influência é muito semelhante para ambas a geometrias. O ângulo de atrito é responsável por cerca de 93% da influência, a coesão é responsável por apenas 7% da variação apesar de possuir maior coeficiente de variabilidade e por último o peso específico não influencia o FoS.

As análises 3D apresentam um FoS maior do que as análises 2D, com uma diferença de 3%. A diferença está intimamente relacionada á geometria tridimensional do talude e á característica da superfície de ruptura. O FoS médio é semelhante para todos os métodos utilizados, determinísticos ou probabilísticos.

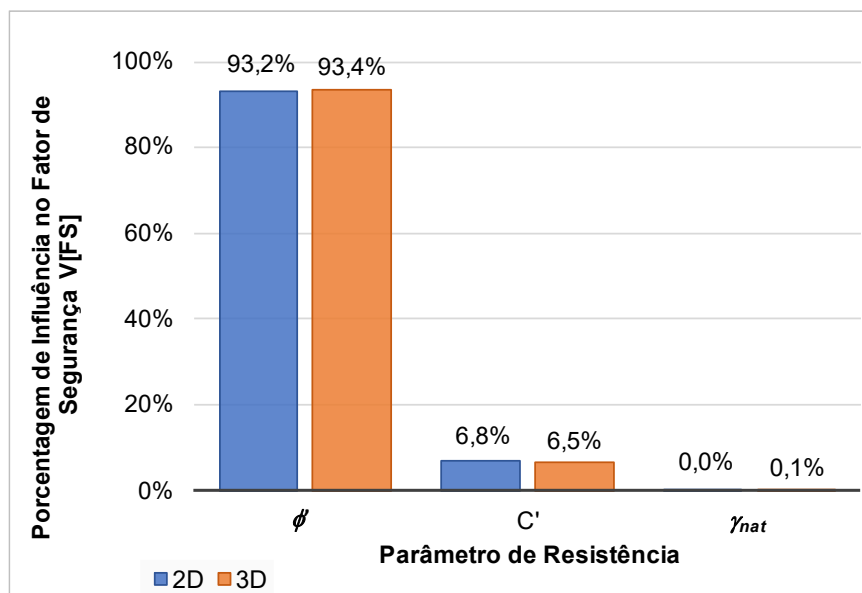


Figura 3. Influência dos parâmetros de resistência no FS para análises 2D e 3D.

A Figura 4 apresenta o índice de confiabilidade para a análise 2D e 3D, para todos os métodos probabilísticos utilizados. Todos os métodos de análise resultaram em bons índices de confiabilidade, com probabilidade de falha por volta de 10^{-6} , que pode ser superior ao tolerado dependendo das consequências de falha. Dessa maneira, embora tenha FoS elevado, a pilha de rejeitos projetada pode não ter uma probabilidade de falha aceitável de fracasso.

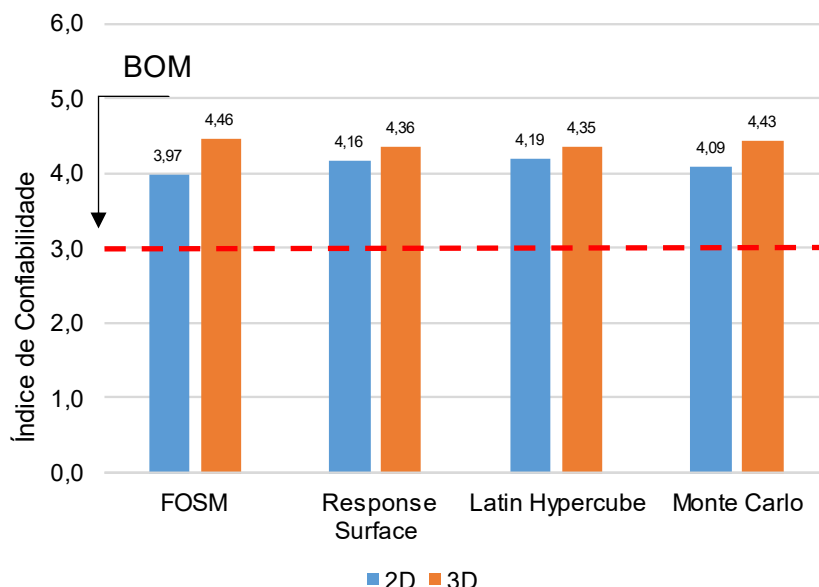


Figura 4. Índice de Confiabilidade para os diferentes métodos probabilísticos de análise 2D e 3D.

É importante ressaltar que os métodos probabilísticos Hieprcubo Latino, Monte Carlo e Método de Superfície de Resposta são os mais confiáveis devido aos cálculos do métodos. Nessa análise, o Método de Superfície de Resposta apresentou valores como o método mais confiável, apresentando maior convergência entre análises 2D e 3D. O FOSM apresentou índice de confiabilidade 2D menor e o maior índice de confiabilidade 3D quando comparado com os outros métodos, apresentando assim valores menos precisos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O artigo apresenta uma análise sobre a segurança de uma pilha seca de rejeitos tridimensional por métodos determinísticos e probabilísticos para análises 2D e 3D. O fator de segurança da análise determinística é semelhante ao fator de segurança médio (FoS) de diferentes métodos probabilísticos, tanto para análise 2D quanto para 3D, devido a geometria utilizada. O FoS da pilha de rejeitos está acima de 1,9 e as análises de estabilidade 3D apresentam um FoS maior do que as análises 2D, com diferença de aproximadamente 3%. Todos os métodos de análise apresentam probabilidade de falha da ordem de 10^{-5} , que pode ser superior ao tolerado dependendo das consequências de falha. Assim apesar de um fator de segurança muito elevado, a pilha de rejeitos projetada pode não ter uma probabilidade de falha aceitável.

4 RECONHECIMENTOS

Agradecemos a Vale e a Geocoba pelo apoio.

5 REFERÊNCIAS

Silva, C.C. (2015) Análise de estabilidade de um talude da Cava de Alegria utilizando abordagem probabilística. Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/6375>

Barbosa, C.V. (2022) Análise de estabilidade tridimensional e bidimensional em uma pilha de rejeito filtrado de grandes dimensões. Universidade Federal de Viçosa. Disponível em: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.620>.

USACE (1997). *Risk-based analysis in Geotechnical Engineering for Support of Planning Studies, Engineering and Design*. US Army Corps of Engineers. Department of Army. Washington, DC, 1997. 20314-100.