

# ANÁLISES ESTÁTICAS E PSEUDOESTÁTICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS TRIDIMENSIONAL A PARTIR DE UM MODELO IMPLÍCITO

Zharry Ribeiro Bueno

Engenheira Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil,  
[zharrybueno@hotmail.com](mailto:zharrybueno@hotmail.com)

Talita Caroline Miranda

D.Sc./Professora, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, [talita@etg.ufmg.br](mailto:talita@etg.ufmg.br)

Giovanna Monique Alelvan

D.Sc./Professora, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil,  
[giovannaalelvan@etg.ufmg.br](mailto:giovannaalelvan@etg.ufmg.br)

**RESUMO:** O propósito fundamental deste estudo é examinar os resultados dos fatores de segurança e da probabilidade de ruptura, confrontando-os com as previsões normativas, com o intuito de validar a relevância da condução de análises de estabilidade de taludes. A abordagem adotada neste trabalho é tridimensional, determinística e probabilística, utilizando um modelo implícito, visando proporcionar uma avaliação mais precisa da condição de segurança das estruturas geotécnicas. Este enfoque não apenas busca compreender os desafios inerentes à estabilidade dos taludes, mas também destaca a importância de adotar métodos avançados que considerem a dinâmica do solo e a complexidade tridimensional das condições geotécnicas. Ao fazê-lo, busca-se contribuir para o aprimoramento das práticas de engenharia geotécnica, promovendo uma abordagem mais abrangente e precisa na avaliação da segurança dessas estruturas cruciais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Determinística, Probabilística, Modelagem Implícita, Slide 3.

**ABSTRACT:** The fundamental purpose of this study is to examine the results of safety factors and probability of failure, comparing them to normative predictions, in order to validate the relevance of conducting slope stability analyses. The approach adopted in this work is three-dimensional, deterministic, and probabilistic, utilizing an implicit model to provide a more accurate assessment of the safety condition of geotechnical structures. This approach not only seeks to comprehend the inherent challenges of slope stability but also underscores the importance of adopting advanced methods that consider soil dynamics and the three-dimensional complexity of geotechnical conditions. By doing so, the aim is to contribute to the improvement of geotechnical engineering practices, promoting a more comprehensive and precise approach in evaluating the safety of these critical structures.

**KEYWORDS:** Deterministic, Probabilistic, Implicit Modeling, Slide 3.

## 1 INTRODUÇÃO

No contexto brasileiro, a engenharia geotécnica desempenha um papel crucial na mitigação de desastres naturais devido à complexidade do solo e à diversidade geológica e geomorfológica do país. Esta disciplina é essencial não apenas na previsão de desastres, resultantes da combinação da suscetibilidade natural a fenômenos com a influência humana, mas também na implementação de soluções através de projetos de engenharia.

A importância da engenharia geotécnica na prevenção de acidentes é destacada por Duarte (2015), que enfatiza a necessidade de análises detalhadas do solo e a implementação de medidas de engenharia para

proteger comunidades e infraestruturas. A nível global, Roque (2018) destaca o papel significativo da engenharia geotécnica na proteção contra eventos naturais extremos, exigindo avanços contínuos na pesquisa geotécnica.

Na indústria de mineração, a engenharia geotécnica é fundamental, abordando propriedades mecânicas e físicas de solos, rochas e materiais geotécnicos. Essa disciplina é essencial na avaliação da estabilidade de estruturas, sustentabilidade ambiental e prevenção de acidentes, conforme normas como a NBR 6484 (ABNT, 2001). O conhecimento das propriedades dos solos é crucial para a elaboração de projetos seguros, conforme Vaz et al. (2018), sendo obtido por meio de ensaios de campo e laboratoriais.

O presente trabalho utiliza um modelo geológico-geotécnico tridimensional de uma barragem, desenvolvido no Leapfrog Works, para realizar análises estáticas, probabilísticas e pseudo-estáticas utilizando o software Slide3. Dados sísmicos e metodologias probabilísticas de outros estudos complementam a abordagem, visando aprimorar a compreensão e prevenção de potenciais riscos em estruturas geotécnicas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Validação e Importação do Modelo

Na validação do modelo implícito utilizado, foi realizada a análise dos resultados e das conclusões do estudo, quais apresentaram resultados satisfatórios para o presente modelo. Esse processo teve como objetivo verificar a precisão e a acurácia do modelo em representar as propriedades geotécnicas do terreno estudado.

Após a validação dos dados e parâmetros, procedeu-se à importação dos sólidos correspondentes a cada tipo de material litológico de maneira individualizada. Os volumes exportados do software LeapFrog Works, adotado nesta pesquisa, foram formatados utilizando a extensão .OBJ. Tal escolha foi motivada pela sua menor exigência computacional e menor detalhamento em comparação à extensão .DXF, decisão tomada em consideração à capacidade do software Slide 3 e ao esforço computacional demandado pelas análises empreendidas.

#### 2.1.1 Criação do nível de água

A delimitação e criação da superfície freática foi realizada de maneira a contemplar o nível máximo da água, em conformidade com a altura do rejeito, com o propósito de avaliar a estrutura em um estado.

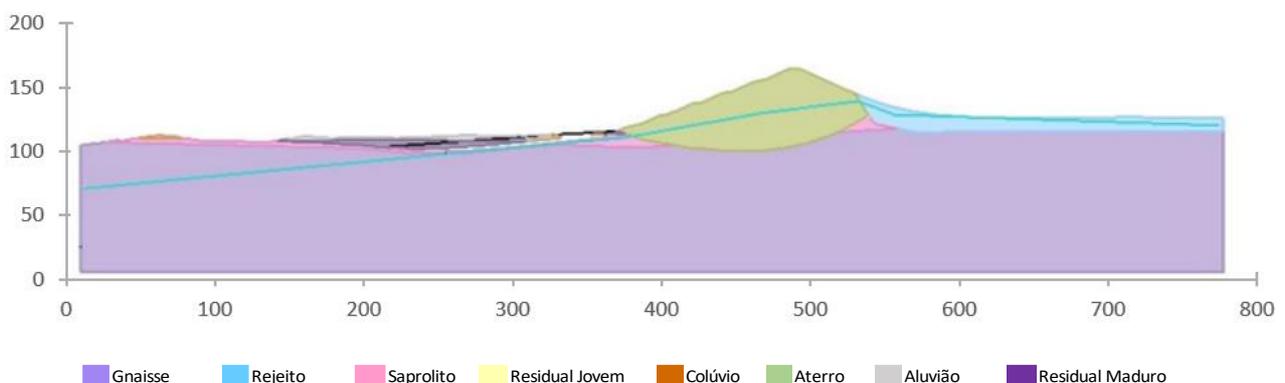


Figura 1. Seção com o nível do rejeito na fase inicial.

## 3 ANÁLISES DE ESTABILIDADE

A utilização de um modelo implícito representativo viabiliza a criação do modelo numérico, permitindo a condução de análises de estabilidade para avaliar a condição de segurança de um talude. Nesse processo, é essencial adotar um método que avalie o comportamento do talude próximo ao ponto de ruptura. Devido à

eficácia, simplicidade e difusão do método de equilíbrio-limite em análises bidimensionais (BRETAS, 2020), e à implementação do método no software Slide 3, para análises tridimensionais, optou-se pela utilização do método neste trabalho.

### 3.1 Análises Determinísticas

Nas análises determinísticas foram utilizados os valores médios dos parâmetros de resistência de cada material, representados na Tabela 1. Nestas análises, o software Slide 3, fornece como resultado, a superfície de ruptura crítica, ou seja, a superfície associada ao FS mínimo.

Foram feitas análises de estabilidade determinísticas utilizando os métodos de Bishop, Morgenstern-Price e Spencer, em todos os casos de carregamento a análise utilizando o método de Bishop resultou em menores valores de FS, por esse motivo serão apresentadas apenas as análises determinísticas que utilizaram este método.

Tabela 1. Parâmetros de resistência dos materiais em avaliação.

Material	$\gamma$	$c'$	$\phi'$
	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kPa]	[°]
Colúvio	18,2	18	22
Aluvião	18	15	20
Residual Maduro	19	10	24
Residual Jovem	20	19	26
Saprolito	21	9	37
Granitoide	21	65	20
Rejeito	18	0	36
Aterro	20	10	25

### 3.2 Análise Pseudo-Estática

O software Slide3 realizou uma análise pseudoestática para calcular o coeficiente sísmico horizontal necessário a fim de atingir o Fator de Segurança Alvo de 1, utilizado para avaliar o momento potencial de ruptura. Essa análise foi conduzida para todas as superfícies de deslizamento, identificando uma superfície crítica que requer o valor mais baixo de  $k_y$  para atingir o FS alvo. A opção de análise escolhida resultou em valores de  $K_y$  em vez de Fator de Segurança, conforme indicado pelo tutorial do Slide3. Se todas as superfícies de deslizamento inicialmente possuem um Fator de Segurança menor que o Alvo, o  $K_y$  crítico relatado será zero. A comparação dos resultados incluiu a análise do coeficiente sísmico apresentado por Altoé (2023), que utilizou o método de Hynes Griffin & Franklin. Esse método considera que o coeficiente sísmico horizontal é igual a 0,5 vezes o pico de aceleração (PGA), com os parâmetros detalhados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de PGA (Altoé, 2023).

Classificação da estrutura	Aceleração	Tempo de Retorno
Significante	0.0093 g	975 anos
Alto	0.0175 g	2475 anos
Muito Alto	0,0270 g	5000 anos
Extremo	0,0409 g	10000 anos

O atual estudo visa avaliar a barragem em suas condições mais críticas, adotando, para fins de comparação, a aceleração com um tempo de retorno de 10.000 anos. Utilizando o método de Hynes Griffin & Franklin, foi obtido um valor crítico para a constante  $K_y$  equivalente a 0,5 vezes 0,0409 g, resultando em 0,02045 g.

### 3.3 Análises Probabilísticas

Segundo Miranda (2020), as análises de estabilidade probabilísticas incorporam a variabilidade dos parâmetros geomecânicos do solo. Quando não há ensaios suficientes para uma análise estatística, Assis (2011) propõe estimar o desvio padrão dos parâmetros geomecânicos usando coeficientes de variação da literatura, conforme mostrado na Equação 1:

$$CV = \frac{\sigma}{m} \times 100 \quad (1)$$

Onde ( $\sigma$ ) é o desvio padrão da amostra e ( $m$ ) é o valor médio do parâmetro.

Os coeficientes de variação neste estudo foram baseados em Miranda (2020) e Baecher e Christian (2003), com um CV de 10% para o ângulo de atrito efetivo e 40% para o intercepto de coesão efetivo. A variabilidade do peso específico dos materiais não foi considerada, pois, de acordo com Pimentel et al. (2017), sua contribuição para a variação do Fator de Segurança é insignificante em comparação com o intercepto de coesão e o ângulo de atrito. Os parâmetros adotados para a avaliação probabilística são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Variação dos parâmetros de resistência na análise probabilística.

Materiais	máx		méd		mín		desvio padrão	
	c' [kPa]	$\phi'$ [°]	c' [kPa]	$\phi'$ [°]	c' [kPa]	$\phi'$ [°]	c' [kPa]	$\phi'$ [°]
Colúvio	25.2	24.2	18	22	10.8	19.8	7.2	2.2
Aluvião	21	22	15	20	9	18	6	2
Residual Maduro	14	26.4	10	24	6	21.6	4	2.4
Residual Jovem	26.6	28.6	19	26	11.4	23.4	7.6	2.6
Saprolito	12.6	40.7	9	37	5.4	33.3	3.6	3.7
Granitoide	91	22	65	20	39	18	26	2
Rejeito	0	44.07	0	35.83	0	32.44	0	2.39
Aterro	14	43.94	10	39.84	6	33.33	4	1.89

## 4 ESTUDO DE CASO

A Barragem em análise, localizada no quadrilátero ferrífero em Minas Gerais, tem como principal função armazenar rejeitos do beneficiamento de minério de ferro. A construção envolveu a execução de um dique de partida em duas etapas, com um aterro inicial para suportar eventos chuvosos antes de finalizar o barramento na altura de projeto. O projeto incluiu um aterro inicial com crista a 898,0 m, comprimento de 273 m e largura de 8,0 m, atingindo uma altura máxima de 36,0 m. A inclinação e geometria dos taludes seguiram as características do maciço final, conforme representado na Figura 2. Este estudo se concentrou na análise tridimensional da barragem durante a fase inicial de enchimento do reservatório, visando avaliar a criticidade do maciço nessa condição.

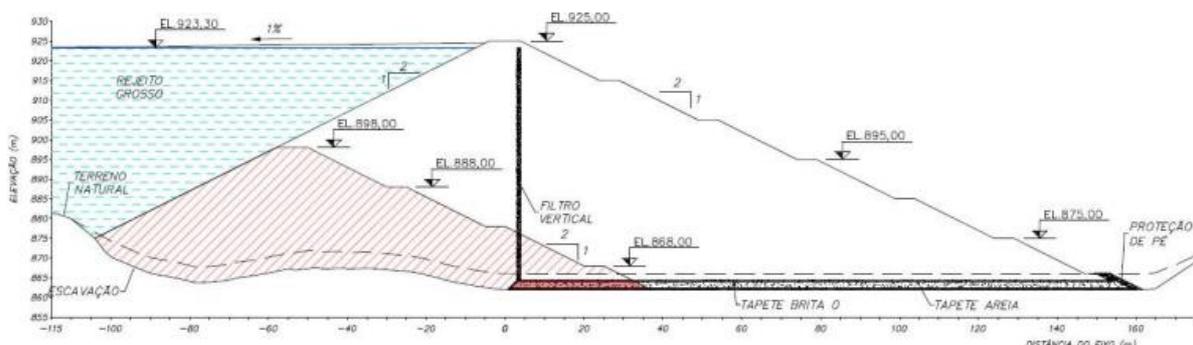


Figura 2. Aterro construtivo na El. 898,00 do dique de partida (Martino, 2023).

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Análise Estática

A estrutura apresentou um FS crítico igual a 1,102 à jusante do maciço, enquanto a cunha de ruptura presente no maciço resultou em 1,263, como apresentam as Figuras 3 (a) e (b). No mapa de calor em função do fator de segurança apresentado na Figura 3 (a), é possível analisar que a cunha de ruptura crítica do maciço apresentou-se a montante da estrutura, pelo fato do baixo nível de rejeito na fase em avaliação. A Figura 3 (b) apresenta as possíveis cunhas de ruptura em função dos FS, e nela é possível analisar que as cunhas de ruptura presentes à jusante do maciço não estão relacionadas a um alto fator de risco devido ao FS.

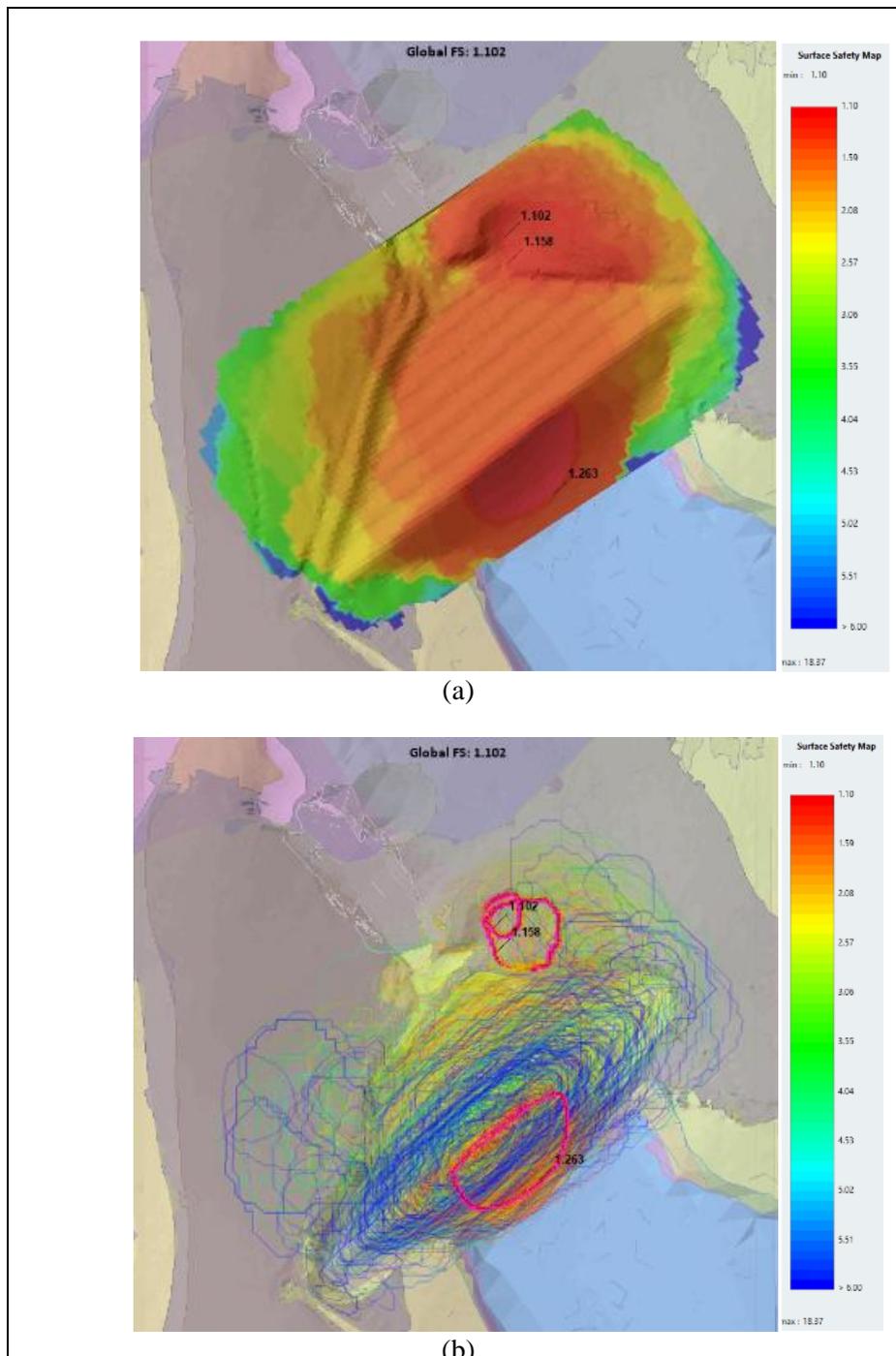


Figura 3. Resultados da análise determinística.

## 5.2 Análise Pseudo-Estática

A análise pseudo-estática apresenta o coeficiente sísmico mínimo capaz de gerar uma possível ruptura, ou seja, atingindo o FS igual a 1. Essa análise resultou em um coeficiente sísmico crítico igual a 0,05 g para as condições de avaliação da estrutura, como apresentado no mapa de segurança em função do coeficiente sísmico na Figura 4 (a). Para efeitos de comparação, baseando na metodologia apresentada por Altoé (2023), o resultado do coeficiente sísmico da região em avaliação, é igual a 0,02045 g. Na Figura 4 (b) são apresentadas as cunhas críticas de ruptura, e a partir dela, é possível observar que na análise pseudo-estática, o modelo não apresentou cunhas de rupturas críticas a jusante do maciço em avaliação, o que representa um ponto positivo na análise da estrutura.

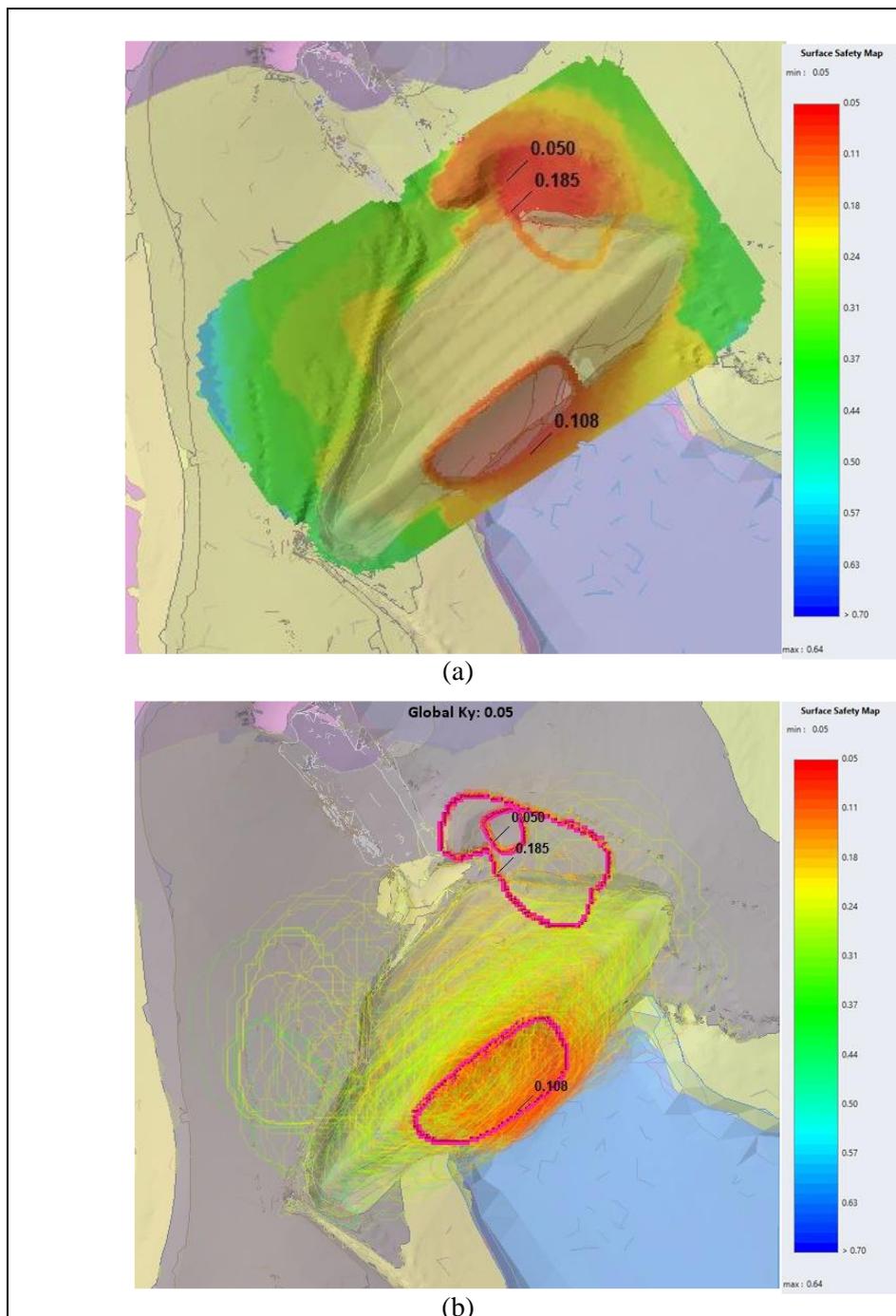


Figura 4. Resultados da análise pseudo-estática.

### 5.3 Análise Probabilística

Com a utilização da abordagem probabilística, o FS médio obtido (1,197) foi inferior ao encontrado na análise determinística (1,263), uma redução de 5,2%. Já a probabilidade de falha obtida foi igual a 7,1%, uma vez que foram encontradas poucas cunhas de ruptura com valores de FS iguais ou inferiores a 1,0 na análise. Nesse contexto, entende-se que a variabilidade dos parâmetros de resistência dos materiais da região tem baixa influência na instabilização da barragem (Figura 5).

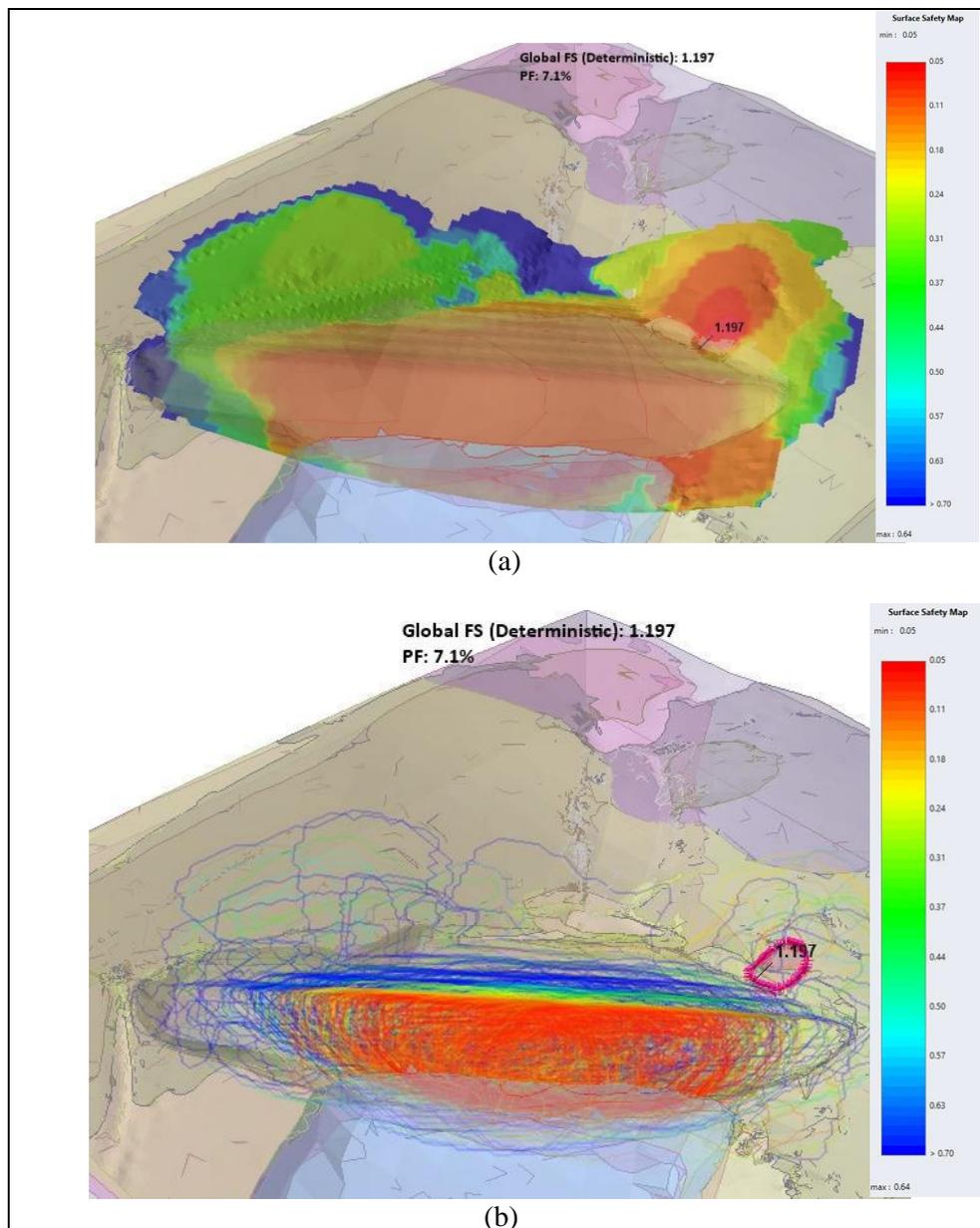


Figura 5. Resultados da análise probabilística.

## 6 CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo principal realizar uma análise tridimensional da estabilidade de uma barragem de rejeitos de mineração, utilizando abordagens determinísticas, pseudo-estáticas e probabilísticas. O foco foi obter valores de fatores de segurança, coeficientes sísmicos críticos e probabilidade de falha, comparando esses resultados com parâmetros aceitáveis de normas técnicas e literatura especializada para avaliar a segurança da estrutura.

O modelo tridimensional foi desenvolvido pelo estudante Gabriel Martino usando dados de campo e laboratório, resultando em um modelo implícito construído no LeapfrogWorks. A implementação do modelo numérico foi feita no Slide3, utilizando parâmetros obtidos por correlações e interpretações de ensaios.

Nas análises determinísticas, os parâmetros foram baseados na média dos resultados de Martino, resultando em fatores de segurança críticos de 1,102 a jusante e 1,263 no maciço. A análise probabilística adotou variações de 40% para coesões e 10% para ângulos de atrito, resultando em um fator de segurança de 1,197 e probabilidade de falha de 7,1%.

A análise pseudo-estática identificou coeficientes sísmicos críticos de 0,05 g e 0,108 g para superfícies específicas. Comparando com o método de Hynes-Griffin, a estrutura mostrou-se segura em relação às condições sísmicas locais.

Embora a análise determinística tenha obtido um fator de segurança próximo ao requerido, classificando a estrutura como de desempenho mediano, destaca-se a importância das abordagens probabilísticas e pseudoestáticas. Compreender o possível gatilho de falha possibilita a implementação de medidas preventivas, evidenciando a importância da integração de abordagens determinísticas e probabilísticas na engenharia geotécnica e na gestão de riscos para uma compreensão mais profunda do comportamento de obras geotécnicas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altoé, J. R. (2023). *Influência das Análises Pseudo-Estáticas na Verificação da Estabilidade de Taludes em Barragens de Rejeito*. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Assis, A. P., Espósito, T., Gardoni Almeida, M., & Maia, J. C. (2011). *Métodos Estatísticos e Probabilísticos Aplicados a Geotecnia*. Brasília, DF: Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.
- Baecher, G. B.; CHRISTIAN, J.T. (2003). *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. John Wiley and Sons LTD, England.
- Bretas, Thiago Cruz. (2020). *Retroanálise Probabilística Tridimensional por Equilíbrio-Limite de Rupturas de Talude em Belo Horizonte/MG*. Dissertação, Universidade Federal de Ouro Preto.
- Duarte, C. C. (2015). *Eventos extremos de chuva e análise da suscetibilidade a movimentos de massa no município do Ipojuca-PE*. Tese de Doutorado, UFPE.
- Martino, Gabriel Cruz de. (2023). *Modelo Implícito Tridimensional de uma Barragem de Rejeitos de Mineração*. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.
- Miranda, Danilo Rodrigues (2020). *Estudo de caso: aplicação de abordagem probabilística em análises de estabilidade de uma barragem de terra*. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Pimentel, K. C. A.; Souza, T. C.; Campello, I. C.; Silva, P. H. A. (2017). *Avaliação Dos Métodos Probabilísticos Aplicados à Estabilidade de Taludes de Barragens*. Em: XXXI Seminário Nacional de Grandes Barragens – Comitê Brasileiro de Barragens, 2017, Belo Horizonte.
- Roque, A. J – (2018). *Ambiente e sustentabilidade: desafios e perspectivas para a Geotecnia* – Revista Geotecnia nº 143, 2018 – pp. 55-83 - Sociedade Portuguesa de Geotecnia.
- Vaz, A. P. M. S., Fiori, A. P., Silveira, C. T., (2018). *Métodos de Obtenção de Valores de Ângulo de Atrito e Coesão: comparação entre o ensaio de cisalhamento direto e cálculo baseado no SPT*. Boletim Paranaense de Geociências 74, 01, 1-10.