

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/72

# INFLUÊNCIA DAS ANÁLISES PSEUDO-ESTÁTICAS NA VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TALUDES EM BARRAGENS DE REJEITO

Júlia Ramos Altoé

Engenheira Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, julia-altoe@hotmail.com

Talita Caroline Miranda

Docente, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, talita@etg.ufmg.br

Ricardo das Chagas Santos

Discente, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, ricardochagas.eng@gmail.com

Nathalia Gabriela Pereira Goulart

Engenheira Civil, Hidro-Br, Belo Horizonte, Brasil, nathaliagpg@gmail.com

**RESUMO:** As análises pseudo-estáticas em geotecnia são técnicas empregadas para examinar como estruturas geotécnicas se comportam diante de cargas sísmicas. Diferentemente das análises dinâmicas, que levam em conta a resposta em tempo real das estruturas às ondas sísmicas, as análises pseudo-estáticas simplificam o problema para uma análise estática. O presente estudo objetiva avaliar a interferência das análises pseudo-estáticas no Fator de Segurança em taludes de uma barragem de rejeito, considerando diferentes geometrias, classificações de risco e tempos de retorno para cada situação. Para essa avaliação foram contemplados dois métodos de análise pseudo-estáticas: Hynes Griffin & Franklin e Bray & Macedo. No fim, será possível fazer uma comparação entre os fatores de segurança obtidos para taludes de jusante e montante, considerando coeficientes sísmicos em barragens com nenhum, um ou três alteamentos feitos à montante. Outra conclusão que poderá ser feita é uma análise de sensibilidade da redução ou aumento dos coeficientes físicos quando as barragens são classificadas em diferentes níveis de riscos e, conseqüentemente, apresentam distintos tempos de retorno. Por fim, será observado a diferença dos resultados para os dois métodos, baseando-se nos fatores de segurança obtidos para cada configuração geométrica e tempo de retorno considerado.

**PALAVRAS-CHAVE:** sismo, análises pseudo-estáticas, taludes, estabilidade de taludes, risco sísmico.

**ABSTRACT:** Pseudo-static analyses in geotechnical engineering are techniques employed to examine how geotechnical structures behave under seismic loads. Unlike dynamic analyses, which take into account the real-time response of structures to seismic waves, pseudo-static analyses simplify the problem for a static analysis. The present study aims to evaluate the interference of pseudo-static analyses on the Safety Factor of slopes in a tailings dam, considering different geometries, risk classifications, and return periods for each situation. For this evaluation, two pseudo-static analysis methods were considered: Hynes Griffin & Franklin and Bray & Macedo. Ultimately, it will be possible to compare the safety factors obtained for downstream and upstream slopes, considering seismic coefficients in dams with zero, one, or three upstream raisings. Another conclusion that can be drawn is a sensitivity analysis of the reduction or increase in physical coefficients when dams are classified at different risk levels and, consequently, present distinct return periods. Finally, the difference in results for the two methods will be observed, based on the safety factors obtained for each geometric configuration and considered return period.

**KEYWORDS:** earthquake, pseudo-static analyses, slopes, slope stability, seismic risk.

## 1 INTRODUÇÃO

Barragens de rejeito são estruturas construídas para armazenar resíduos provenientes de atividades como a mineração (WERNECK, 2019). Os rejeitos são materiais indesejados ou não aproveitáveis resultantes dos processos de extração e beneficiamento de minério. Quando não projetada, construída ou gerenciada corretamente, a barragem pode entrar em colapso, causando grandes desastres ambientais e humanos, devido a isso, medidas de segurança e monitoramento são necessárias para minimizar o risco de rupturas.

Atualmente, o processo de retomada de reservatórios tem sido implantado em sistemas de rejeito como tecnologia alternativa à construção de novos reservatórios. A atividade de retomada tem o benefício de promover o ganho de volume nos reservatórios existentes para posterior disposição de rejeito transportado hidraulicamente, com menor teor de sólidos (maior umidade). Como consequência, as estruturas existentes aumentam sua vida útil. Segundo Sousa e Gomes (2018), neste processo, o material já seco, é escavado do reservatório, transportado e disposto em pilhas controladas, enquanto rejeitos recentes são depositos na cavidade formada na barragem, para extração da fase líquida.

Visando a maior segurança da operação, a norma brasileira NBR 13028:2017 - Mineração - Elaboração e apresentação de projetos de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água, estabelece no seu subitem 5.3.6 a necessidade dos estudos sísmicos em projetos de barragem. Nesse contexto, uma alternativa ao cumprimento deste subitem da norma, é a realização de análises pseudo-estáticas. Segundo CRUZ (2017) análises pseudo-estáticas na geotecnia são métodos utilizados para avaliar o comportamento de estruturas geotécnicas sujeitas a carregamentos sísmicos. Ao contrário das análises dinâmicas, que consideram a resposta em tempo real das estruturas às ondas sísmicas, as análises pseudo-estáticas simplificam o problema, tratando-o como um problema estático. Nestas análises, as acelerações sísmicas são convertidas em forças estáticas equivalentes, que são aplicadas às estruturas geotécnicas. Essas forças são distribuídas de acordo com os parâmetros de resistência e geometria da estrutura. Como resultado é feita uma avaliação da estabilidade e os deslocamentos resultantes sob as condições de carregamento sísmico.

O software Slide, desenvolvido pela Rocscience, é uma ferramenta amplamente utilizada na engenharia geotécnica para análises de estabilidade de taludes e estruturas de contenção. Ele oferece recursos para realizar análises pseudo-estáticas, que permitem avaliar o comportamento de uma estrutura sujeita a carregamentos sísmicos.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Configurações Geométricas consideradas para as análises

Para este estudo serão avaliadas algumas configurações geométricas escolhidas a fim de criar-se uma sensibilidade dos materiais e fatores que mais interferem no fator de segurança obtido através das análises pseudo-estáticas. A geometria da barragem-tipo varia para as análises de cunhas de ruptura à jusante ou montante (Figura 1).

#### 2.2.1. Configurações para análises de ruptura à jusante

Para as análises de ruptura à jusante foram consideradas 3 configurações, sendo a primeira uma barragem sem alteamentos, a segunda configuração conta com uma barragem com 1 alteamento à montante e a terceira configuração conta com 3 alteamentos à montante.

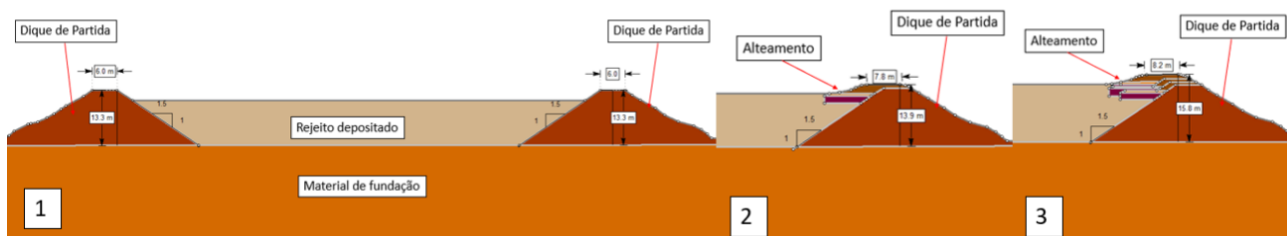


Figura 1. Configurações geométricas para análises de ruptura à jusante.

### 2.1.2. Configurações para análises de ruptura à montante

Para as análises de ruptura à montante também foram consideradas 3 configurações, sendo a primeira uma barragem sem alteamentos, a segunda configuração conta com uma barragem com 1 alteamento à montante e a terceira configuração conta com 3 alteamentos à montante (Figura 2).

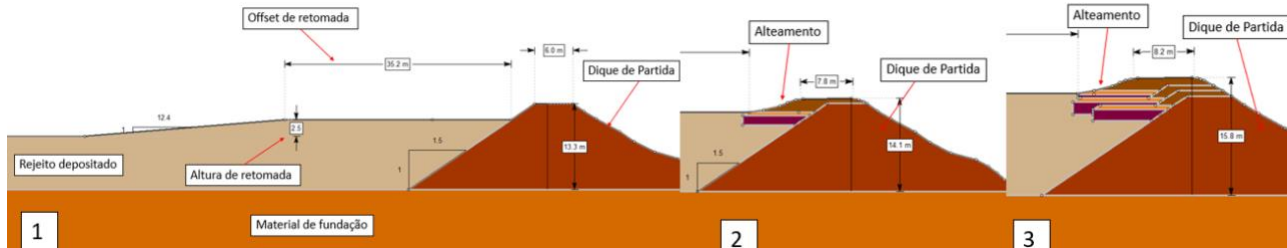


Figura 2: Configurações geométricas para análises de ruptura à montante.

## 2.2 Classificação de risco das Estruturas

Para o estudo de classificação das estruturas será utilizado o referencial teórico “Canadian Dam Association - Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams, 2014 ED. 2019. Este documento apresenta diversas diretrizes de segurança de barragens de mineração, dentre elas classifica-se a estrutura (barragem) considerando: a existência de população exposta na área de dano potencial estipulada; a perda de vidas potencial em casa de ocorrência de eventos críticos; danos ambientais entre outros critérios apresentados na Figura 3.

Dam class	Population at risk [note 1]	Incremental losses		
		Loss of life [note 2]	Environmental and cultural values	Infrastructure and economics
Low	None	0	Minimal short-term loss No long-term loss	Low economic losses; area contains limited infrastructure or services
Significant	Temporary only	Unspecified	No significant loss or deterioration of fish or wildlife habitat Loss of marginal habitat only Restoration or compensation in kind highly possible	Losses to recreational facilities, seasonal workplaces, and infrequently used transportation routes
High	Permanent	10 or fewer	Significant loss or deterioration of <i>important</i> fish or wildlife habitat Restoration or compensation in kind highly possible	High economic losses affecting infrastructure, public transportation, and commercial facilities
Very high	Permanent	100 or fewer	Significant loss or deterioration of <i>critical</i> fish or wildlife habitat Restoration or compensation in kind possible but impractical	Very high economic losses affecting important infrastructure or services (e.g., highway, industrial facility, storage facilities for dangerous substances)
Extreme	Permanent	More than 100	Major loss of <i>critical</i> fish or wildlife habitat Restoration or compensation in kind impossible	Extreme losses affecting critical infrastructure or services (e.g., hospital, major industrial complex, major storage facilities for dangerous substances)

Figura 3: Quadro de classificação de risco de barragens, conforme CDA (2019).

Para as análises de ruptura à jusante serão considerados as consequências de falha “muito alto” e “extreme” para se obter uma sensibilidade da diferença dos fatores de segurança obtidos para cada uma das classificações. Para as análises de ruptura à montante, as duas classificações consideradas serão “significante” e “alta”, com o objetivo de avaliar a alteração no fator de segurança para cada um dos níveis de risco.

### 2.3 Determinação de Períodos de Retorno

Para o estudo do período de retorno, será utilizado o referencial teórico: Dam Safety Guidelines – 2013. O tempo de retorno para barragens é um parâmetro utilizado para estimar a probabilidade de ocorrência de um evento, como um abalo sísmico, que possa colocar em risco a segurança da barragem. Este é definido como o intervalo médio de tempo entre a ocorrência de um evento com uma determinada magnitude ou intensidade. A Tabela 1 apresenta sugestões sobre o tempo de retorno a ser aplicado para cada classificação de risco.

Tabela 1: Níveis de risco e seu respectivo tempo de retorno (CDA, 2019).

Dam Classification	Annual Exceedance Probability – Earthquakes (note 1)
Low	1/100 AEP
Significant	Between 1/100 and 1/1,000
High	1/2,475 (note 2)
Very High	1/2 Between 1/2,475 (note 2) and 1/10,000 or MCE (note 3)
Extreme	1/10,000 or MCE (note3)

Da mesma forma como supracitado, para as análises de ruptura à jusante serão considerados as consequências de falha “muito alto” e “extreme”, já para as análises de ruptura à montante, as classificações “significante” e “alta”.

### 2.4 Peak Ground Acceleration - PGA (Pico de Aceleração Sísmica)

Para a região analisada (Porto de Trombetas), foi emitido um relatório técnico em 2019 que trata sobre a aceleração a ser utilizada para o local, a depender da classificação de risco da barragem. Dessa forma, sintetizou-se na Tabela 2, os picos de aceleração que serão considerados.

Tabela 2: Classificações e parâmetros que utilizados.

Classificação da estrutura	Método Probabilístico (MDE)	
	Aceleração	Tempo de retorno
Significante	0,0093 g	975 anos
Alto	0,0175 g	2.475 anos
Muito Alto	0,0270 g	5.000 anos
Extremo	0,0409 g	10.000 anos

### 2.5 Método de Hynes-Griffin & Franklin (1984)

A metodologia de Hynes-Griffin & Franklin, como descreve Duncan (2014), foi desenvolvida para barragens de terra e refletem os resultados de análises extensivas. Após a definição do parâmetro aceleração (PGA), a análise de estabilidade pseudo-estática deverá ser conduzida utilizando um coeficiente sísmico igual a ½ (0,5) do pico de aceleração previsto. Por conseguinte, deve-se utilizar uma envoltória de resistência multiplicando a resistência ao cisalhamento por 0,8. Por fim, o fator mínimo satisfatório, defino pelo autor do método é de 1,0. ( $FS \geq 1,0$ ).

### 2.6 Método de Jonathan D. Bray & Jorge Macedo (2019)

O método de Bray e Macedo (2019), objetiva fornecer estimativas de deslocamentos de taludes quando solicitados por uma aceleração sísmica. O cálculo do coeficiente sísmico “k”, passa pelas seguintes etapas:

- 1- Cálculo do  $T_s$  (período espectral) com a equação descrita abaixo, sendo  $H$  a altura máxima do bloco deslizante, retirada das configurações geométricas propostas e o fator  $V_s = 250 \text{ m/s}$  como proposto em relatório técnico (2019) de risco sísmico para a região de estudo.

$$T_s = 4 \times \frac{H}{V_s} \quad (1)$$

- 2- Cálculo do  $S_a$  (aceleração espectral), que será obtido através do gráfico (*Spectral Acceleration x Period*) disponibilizado no relatório técnico de risco sísmico (2019) para a região do estudo. O gráfico não foi apresentado pois o relatório é confidencial.
- 3- Cálculo dos fatores “a” e “b” através das equações a seguir, sendo Sendo  $D_a = 5 \text{ cm}$  (deslocamento máximo) e  $M$  como sendo a máxima magnitude possível do sismo considerado, para cada tempo de retorno, encontrado no relatório técnico de risco sísmico para a região de estudo (2019). Ademais o  $\varepsilon$  (coeficiente de variação associado a uma distribuição normal de média) considerado foi de 1,48 associado a uma probabilidade de excedência de 2,5%., isto é, encontrando nas análises de estabilidade um FS igual a 1,0, têm-se uma chance de 2,5% de que seu deslocamento na estrutura, provocado pelo sismo, seja superior a 5 cm ( $D_a$ ).

$$a = 2,491 - 0,344 \times \ln(S_a(1,3T_s)) \quad (2)$$

$$b = a_2 - 0,98[(\ln D_a - a - 2,703 \ln(S_a(1,3T_s)) + 0,089(\ln(S_a(1,3T_s)))^2 - a_2 T_s - a_3(T_s)^2 - 0,6070M - \varepsilon] \quad (3)$$

- 4- Cálculo do “k” (coeficiente de aceleração), através da equação 4.

$$k = \frac{-a + \sqrt{b}}{0,49} \quad (4)$$

### 3 RESULTADOS

Foram realizadas as análises de estabilidade para cada uma das configurações geométricas sugeridas, bem como para o tempo de retorno estudados. Por fim, os resultados foram compilados em tabelas.

#### 3.1 Método de Hynes & Franklin

Na Tabela 3 são apresentados os resultados das análises de estabilidade considerando o método de Hynes & Franklin. Ressalta-se que a coluna de resultados “FS sismo” se refere as análises quando se considera apenas o PGA para dado tempo de retorno, e a coluna “FS sismo com atenuação” considera o método de fato, com as atenuações aplicadas.

Percebe-se, portanto, que a redução do fator de segurança foi significativa para este método, variando de uma redução de 0,51 até 0,59 para as rupturas à jusante e de 0,64 a 0,96 para as rupturas à montante. As Figuras 4 a 6, mostram parte das análises obtidas. Para estas foi analisada a ruptura à jusante, considerando um TR de 5.000 anos.

Tabela 3: Resultados obtidos para a metodologia de Hynes Griffin & Franklin  
 Método Hynes Griffin & Franklin Franklin

Ruptura à Jusante					
Configuração	TR 5.000 anos – PGA 0.027 g			TR 10.000 anos PGA – 0.409 g	
	FS estático	FS Sismo	FS sismo com atenuação	FS sismo	FS sismo com atenuação
1	2,48	2,33	1,92	2,26	1,89
2	2,38	2,24	1,84	2,17	1,82
3	2,28	2,16	1,77	2,09	1,75

Ruptura à Montante					
Configuração	TR 5.000 anos – PGA 0.0093 g			TR 2.475 anos PGA – 0.0175 g	
	FS estático	FS Sismo	FS sismo com atenuação	FS estático	FS sismo
1	2,78	2,25	2	1,93	1,82
2	2,47	2,04	1,79	1,76	1,65
3	2,36	1,98	1,72	1,73	1,6

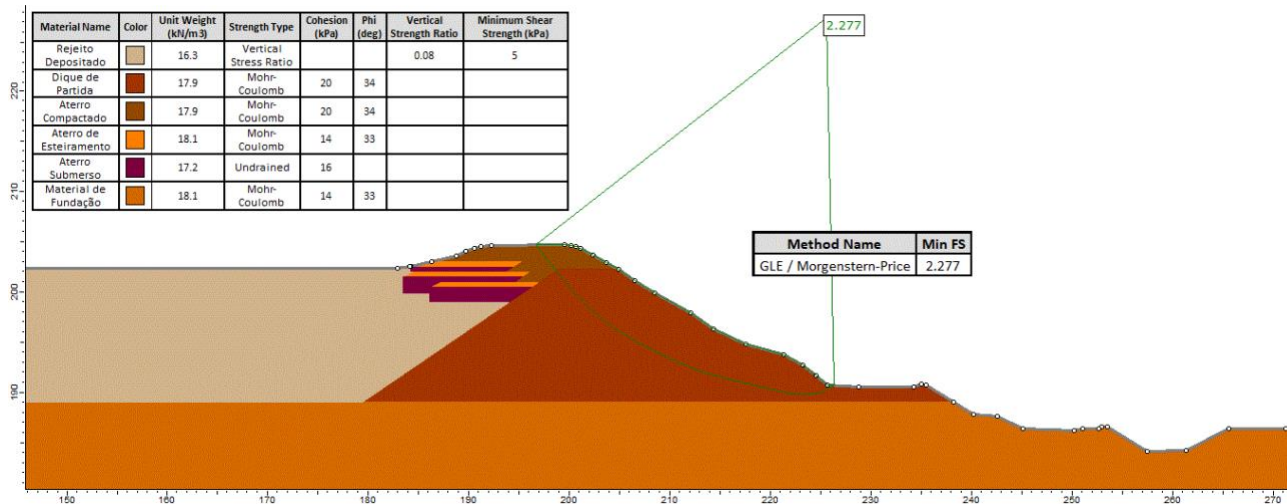


Figura 4: Configuração 3 – Ruptura à jusante - Análise Estática – TR 5.000 anos – FS 2.28.

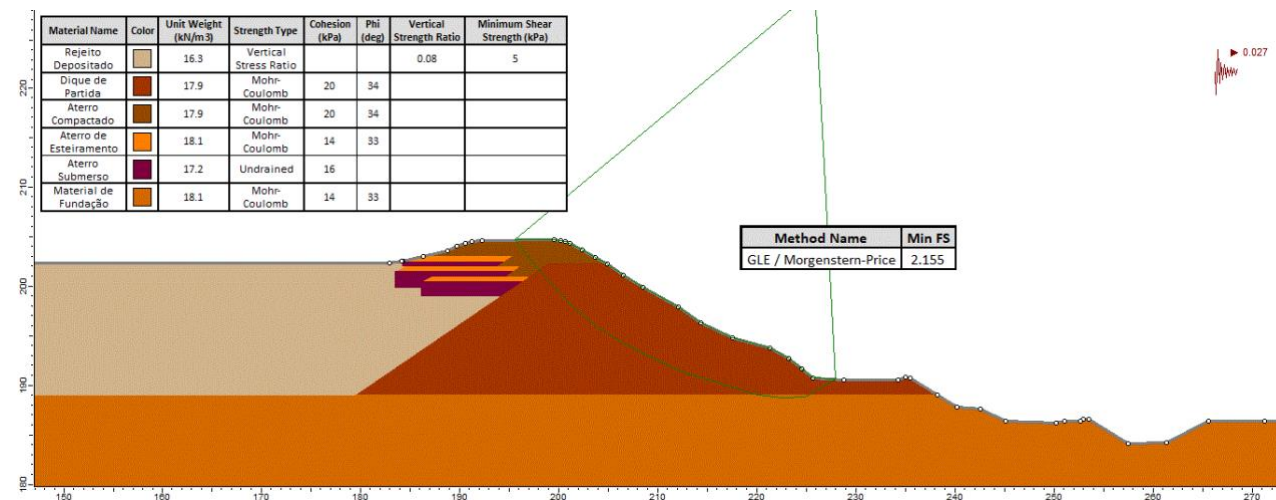


Figura 5: Configuração 3 – Ruptura à jusante - Análise Sismo– TR 5.000 anos – FS 2.16.

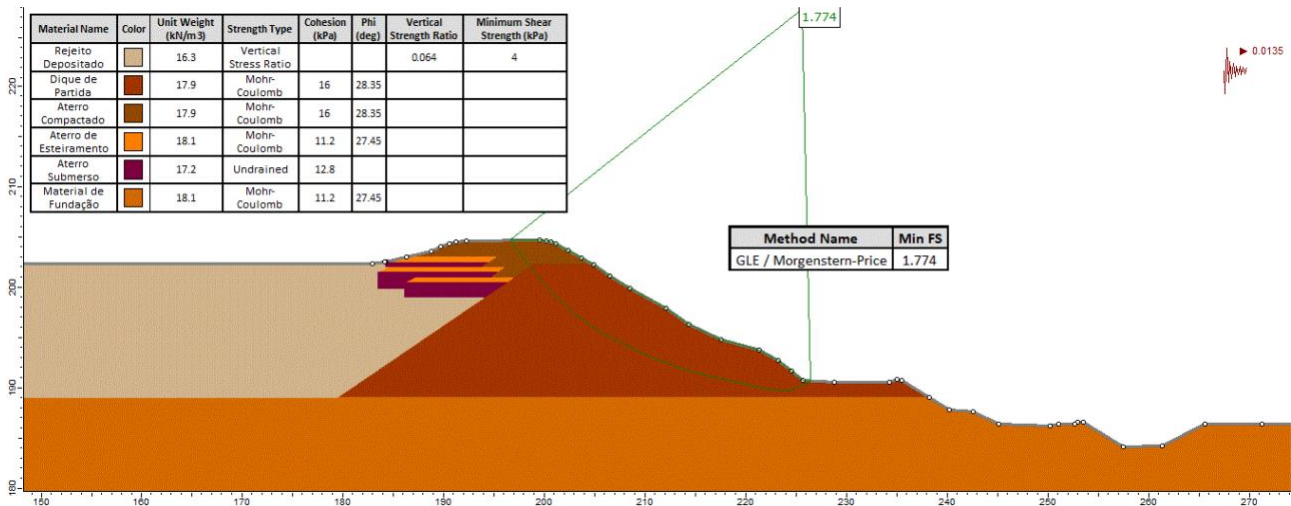


Figura 6: Configuração 3 – Ruptura à jusante - Análise Hynes & Franklin– TR 5.000 anos – FS 1.77.

### 3.2 Método de Bray & Macedo

Na Tabela 4 resume-se os resultados das análises de estabilidade considerando o método de Bray & Macedo. Percebe-se, portanto, que a redução do fator de segurança neste método, foi consideravelmente menor, variando de uma redução de 0,08 até 0,13 para as rupturas à jusante e de 0,14 a 0,51 para as rupturas à montante. Um exemplo das análises obtidas é apresentado na Figura 7, considerando um TR de 5.000 anos.

Tabela 4: Resumo dos Resultados obtidos para o método de Bray & Macedo

Método Hynes Griffin & Franklin Franklin			
Ruptura à Jusante			
Configuração	TR 5.000 anos – 0.015 g		TR 10.000 anos – 0.024 g
	FS -Estático	FS -Sismo	FS- Sismo
1	2,48	2,4	2,35
2	2,38	2,3	2,26
3	2,28	2,21	2,16
Ruptura à Montante			
Configuração	TR 5.000 anos – 0.003 g		TR 2.475 anos – 0.009 g
	FS -Estático	FS -Sismo	FS- Sismo
1	2,78	2,59	2,27
2	2,47	2,31	2,05
3	2,36	2,22	1,99

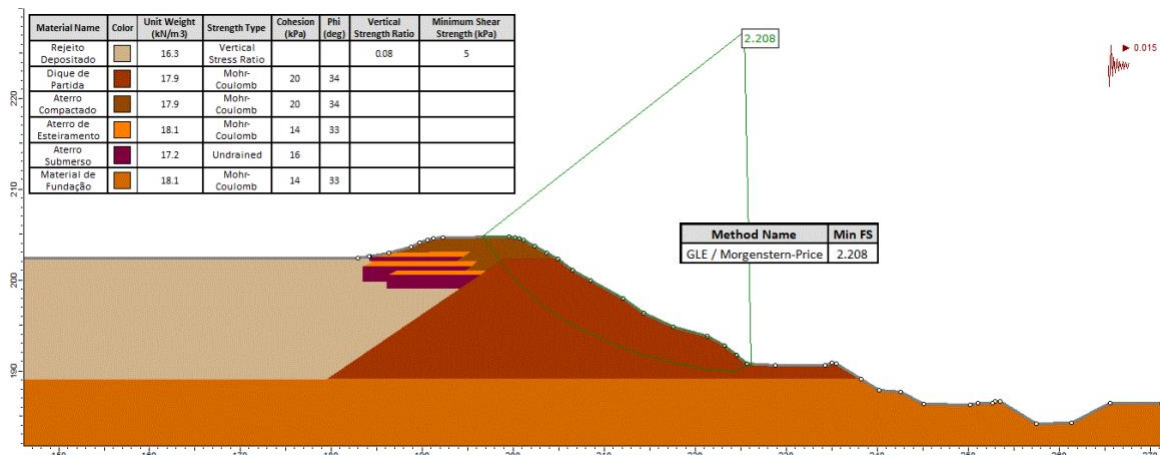


Figura 7: Configuração 3 – Ruptura à jusante – Análise de Bray & Macedo - TR 5.000 anos – FS 2.21

## 4 CONCLUSÕES

Como supracitado, os coeficientes sísmicos considerados no método de Bray & Macedo retornaram maiores fatores de segurança, fazendo com que o método de Griffin & Franklin seja mais conservador para a barragem adotada neste estudo, mas não se pode afirmar que o método de Bray & Macedo seja mais arrojado no geral, isso pois, quando se fazem os cálculos com uma altura maior de bloco deslizante (H), o método resulta em coeficientes sísmicos mais elavados, o que gera FS menores.

Outro importante fator a ser levado em consideração é que o rejeito se demonstrou mais susceptível ao efeito do sismo, dessa forma, mesmo com menores coeficientes sísmicos (devido aos menores tempos de retorno), houve uma maior redução do fator de segurança para ambos os métodos.

Algo a se destacar é que no programa Slide o talude é dividido em blocos ou fatias que representam seções individuais da encosta. Cada bloco é tratado como uma entidade discreta e independente, e o programa considera o equilíbrio de cada bloco separadamente. Esses blocos são geralmente definidos por planos de falha potenciais que podem ocorrer na encosta.

Nesse contexto estima-se que num programa de diferenças finitas seja possível representar de maneira mais fiel o efeito do sismo na estabilidade dos taludes, pois se configura uma análise dinâmica. Apesar de reconhecer esta limitação do software Slide, este é uma ferramenta eficaz e amplamente utilizada para realizar análises pseudo-estáticas de estabilidade de taludes, fornecendo informações importantes para o projeto e a mitigação de riscos geotécnicos.

## REFERÊNCIAS

- ABRAMSON, Lee; LEE, Thomas; SLOAN, S. (2001). *Slope Stability and Stabilization Methods* (Estabilidade de Taludes e Métodos de Estabilização).
- AYALA, Grover R. Llanque; CALVALCANTI, Maria do Carmo Reis; MAHLER, Cláudio Fernando. (2020). *Análise de Estabilidade de Talude Considerando o Efeito Sísmico de uma Barragem de Rejeito de Minério de Ferro* - XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG, 2020.
- CDA (Canadian Dam Association) (2019) *Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams*.
- CRUZ, Felipe Souza - *Análise Pseudo-Estática* (2021). *Definição Do PGA (NBR13028:2017)* – BVP Geotecnia e Hidrotecnia, 2021.
- DUNCAN, Michael; WRIGHT, Stephen; BRANDON, Thomas (2014). *Soil Strength and Slope Stability* – Second Edition.
- Relatório Técnico de risco sísmico para a região estudada (2019) – Confidencial.
- SILVA, João – *Os métodos de equilíbrio limite e dos elementos finitos na análise de estabilidade de taludes* (2011). Faculdade de engenharia Universidade do Porto.