

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Avaliação Probabilística da Estabilidade de uma Barragem de Rejeitos

Fabio Silva

Engenheiro Geotécnico, PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, fmsilva777@gmail.com

Alberto Sayão

Professor Associado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, sayao@puc-rio.br

RESUMO: Este trabalho apresenta a utilização de Métodos de Equilíbrio Limite (MEL) em conjunto com métodos numéricos pela abordagem probabilística, para avaliação da estabilidade de uma barragem de rejeitos de mineração de ferro situada no Quadrilátero Ferrífero, no Estado de Minas Gerais. O estudo tem como objetivo apresentar uma análise crítica comparativa dos métodos de avaliação de estabilidade de uma barragem de rejeitos, por meio do MEL, adotando a abordagem probabilística com auxílio de análises de tensão versus deformação pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Buscou-se comparar os resultados da aplicação dos métodos supracitados, bem como avaliar a influência das diferenças intrínsecas entre eles nos resultados obtidos. Os resultados indicaram que a consideração de uma superfície de ruptura livre foi fator preponderante na influência dos parâmetros na PR (Probabilidade de Ruptura). Concluiu-se também que os métodos de cálculo do FS tiveram maior influência no valor da PR do que o excesso de poropressão atuante na fundação. Ademais o fato do MEF considerar taxas de mobilização diferenciadas ao longo da superfície de ruptura também afetou os resultados.

PALAVRAS-CHAVE: Tensão vs Deformação, Probabilidade de Ruptura, Barragem de Rejeito, FOSM, Monte Carlo.

ABSTRACT: This work presents the use of Limit Equilibrium Methods (LEM) and numerical methods by the probabilistic approach, in order to evaluate the stability of an iron ore tailings dam located in Minas Gerais's Iron Quadrangle. The study aims to present a critical comparative analysis of each method for evaluating the stability of a tailings dam using the LEM, by the probabilistic approach associated with stress-strain analysis by the Finite Element Method (FEM). This study compares the results of the aforementioned methods, as well as the evaluation of the influence of intrinsic differences between each method in the results obtained. The results indicated that the consideration of a free failure surface search algorithm was a major factor in the influence of each parameter on the PF (Probability of Failure). It was also concluded that the FS calculation method had a greater influence on the PF than the excess pore pressure acting in the foundation. Furthermore, the fact that the FEM analysis considers different shear strength mobilization rates along the failure surface, also influenced the results.

KEYWORDS: Stress-strain, Probability of Failure, Tailings Dam, FOSM, Monte Carlo

1 Introdução

O avanço da produção mineral tem demandado a utilização de áreas cada vez maiores para disposição dos rejeitos e estéréis oriundos do processo de extração e beneficiamento de minério. Trata-se de uma demanda crescente em escala global, que exige estudos mais complexos acerca do comportamento de estruturas para armazenamento de rejeitos submetidas à diferentes tipos de carregamentos e fenômenos geotécnicos.

Em geral, os fenômenos a serem estudados dependem de condições geométricas do meio físico, dos materiais de construção utilizados, dos métodos construtivos e de características geomecânicas do material disposto.

Recentemente a discussão do tema de segurança de barragem tem ganhado força no Brasil, principalmente após as tragédias desencadeadas pelas rupturas de duas grandes barragens de rejeito em



Mariana e Brumadinho. Neste contexto, a adoção de métodos probabilísticos na avaliação de estabilidade de barragens vem sendo intensificada nos projetos.

Este trabalho apresenta o estudo de caso do alteamento de uma barragem de rejeito de mineração de ferro que foi construída sobre um depósito de solos residuais e solos saprolíticos compressíveis. Durante a construção de seu último alteamento, a barragem apresentou recalques e trincas transversais e longitudinais, em diversos pontos. Fenômeno que se intensificou à medida que a obra avançou, culminando na paralisação das atividades de alteamento.

2 Histórico da Barragem

A Barragem selecionada como objeto deste estudo, situada na região do Quadrilátero Ferrífero, foi construída na década de 1980 pelo método de jusante, com materiais de empréstimo oriundos de solos residuais nas proximidades da estrutura.

Ao final da construção da primeira etapa do maciço, a barragem possuía aproximadamente 53 metros de altura, tendo sua crista na El. 813 m. O maciço foi composto por espaldares de constituição silte argilosa, com um núcleo central constituído com argila siltosa de baixa permeabilidade.

Desde sua construção, a barragem foi submetida a três obras de alteamento. O projeto do primeiro alteamento previa uma elevação de 20 m na crista da barragem, entretanto, esta obra foi sequenciada em duas etapas, sendo a primeira finalizada em 2005 (1A) e a segunda em 2009 (1B), ascendendo a crista da barragem para a El. 833 m. Em 2015, com o enchimento do reservatório, houve necessidade de um alteamento de 3 m na crista da barragem (2), afim de assegurar a segurança hidráulica da estrutura. Em 2019 iniciaram-se as obras do que seria o terceiro e ultimo alteamento da barragem, o qual elevaria a crista do maciço para a El. 850 m. No entanto, no mesmo ano, a barragem teve suas obras de alteamento paralisadas na El. 819 m (3) em decorrência das anomalias observadas no maciço.

A Figura 1 apresenta a composição do maciço da barragem e seu histórico construtivo.

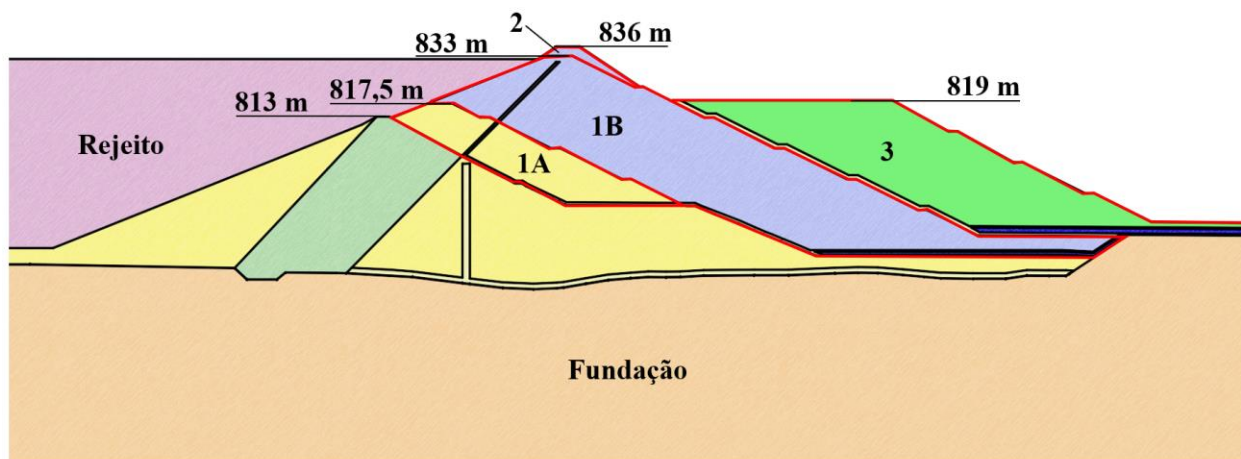


Figura 1. Composição do maciço e histórico de alteamentos – Seção típica (Adaptado de Silva, 2021).

A Figura 2 apresenta uma imagem de satélite da barragem, sobreposta pela seção crítica de análise considerada no estudo (Seção A-A).



Figura 2. Localização da seção de análise A-A (fonte: Google Earth, 2021).

3 Modelo Geotécnico da Fundação

A fundação da barragem é composta principalmente por solos saprolíticos de origem Gnaiss e Xisto, apresentando presença de solos residuais e colúvios em algumas porções localizadas. O modelo geológico-geotécnico da barragem mostra uma interface com padrão de altos e baixos sucessivos entre o solo saprolítico e o saprolito, em que os aprofundamentos do saprolito devem corresponder a zonas preferenciais de penetração do intemperismo. Desde as primeiras campanhas de investigação, já se observava esse padrão dominado por bolsões de solos mais compressíveis com valores de N_{spt} inferiores a 10 golpes, frequentemente atingindo valores próximos a 5 golpes. Os bolsões, que são compostos por solos residuais e solos saprolíticos compressíveis, foram designados em uma unidade geotécnica denominada SAC (Solos de Alta Compressibilidade). A Figura 3 apresenta a seção geotécnica da fundação da barragem na Seção A-A, enquanto a Tabela 1 apresenta as descrições das unidades geotécnicas designadas.

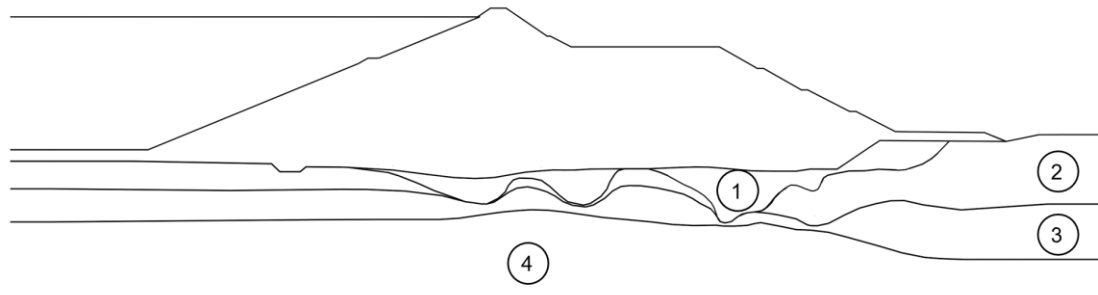


Figura 3. Modelo geotécnico da fundação na seção A-A (Silva, 2021).

Tabela 1. Modelo geotécnico da fundação da seção A-A (Silva, 2021).

Identificação	Unidade geotécnica	Classificação
1	Solos Compressíveis (SAC)	Agrupamento de solos residuais e solos saprolíticos compressíveis
2	Solo Saprolítico de Gnaiss (SSG)	Solos saprolíticos de média compressibilidade
3	Saprolito de Gnaiss (SG)	Saprolito de origem gnaiss com textura silte arenosa, pouco compressível
4	Gnaiss Alterado (RGA)	Embassamento cristalino alterado

4 Metodologia de Análise e Estruturação do Modelo

O objetivo deste estudo foi apresentar uma análise comparativa dos métodos de avaliação de estabilidade e desempenho de uma barragem de rejeitos adotando a abordagem probabilística com auxílio de análises de tensão versus deformação por MEF. Com este objetivo são comparados resultados de análises de estabilidade,



pela abordagem probabilística, utilizando os métodos FOSM e Monte Carlo (Metropolis e Ulam, 1949), com análises de tensão vs deformação pelo MEF, utilizando o método FOSM.

Adotou-se como métodos de cálculo de FS (Fator de Segurança), os métodos de Bishop Simplificado (1955) e Morgenstern & Price (1965).

O estudo admite como variáveis aleatórias os parâmetros c' , ϕ' e γ_n das duas unidades geotécnicas predominantes na fundação da barragem: SAC e SSG, o que totaliza 6 parâmetros variáveis. Por meio da análise dos resultados de 31 ensaios triaxiais do tipo CIU realizados em amostras das unidades geotécnicas SAC (13 amostras) e SSG (18 amostras), obteve-se as distribuições probabilísticas e parâmetros estatísticos apresentados na Tabela 2, parâmetros estes utilizados nas análises FOSM e Monte Carlo.

Tabela 2. Distribuições probabilísticas e parâmetros estatísticos das variáveis aleatórias (Silva, 2021).

Dado	SSG			SAC		
	c' kPa	ϕ' °	γ kN/m ³	c' kPa	ϕ' °	γ kN/m ³
Distribuição	Log-normal	Normal	Normal	Log-normal	Log-normal	Normal
Média	9,22	28,16	17,53	20,1	24,42	16,92
Desvio Padrão	10,49	4,71	1,84	12,41	3,16	1,85
Mínimo relativo	9,22	14,13	5,52	20,1	9,48	5,55
Máximo relativo	100	14,13	5,52	100	9,48	5,55

O estudo avaliou a segurança da barragem em dois momentos específicos, após a paralisação do 3º alteamento:

1. Imediatamente após a paralisação da construção, quando os excessos de poropressão na fundação atingem seus valores máximos;
2. Após a dissipação total dos excessos de poropressão provocados pela construção do 3º alteamento.

Na análise numérica os materiais foram simulados pelo modelo constitutivo Hardening Soil (Schanz et. al 1999), utilizando dados de monitoramento da barragem na calibração dos módulos de deformabilidade dos materiais da fundação. Já os parâmetros de deformabilidade dos materiais que compõem o maciço compactado foram obtidos mediante reprodução numérica das curvas de tensão desviadora vs deformação axial dos ensaios triaxiais realizados.

A geometria da seção A-A foi reproduzida em uma malha de elementos finitos composta por aproximadamente 17.000 elementos triangulares de 15 nós.

A Figura 4 mostra a distribuição dos elementos finitos dentro da malha, bem como os materiais que compõe o maciço e a fundação da barragem.

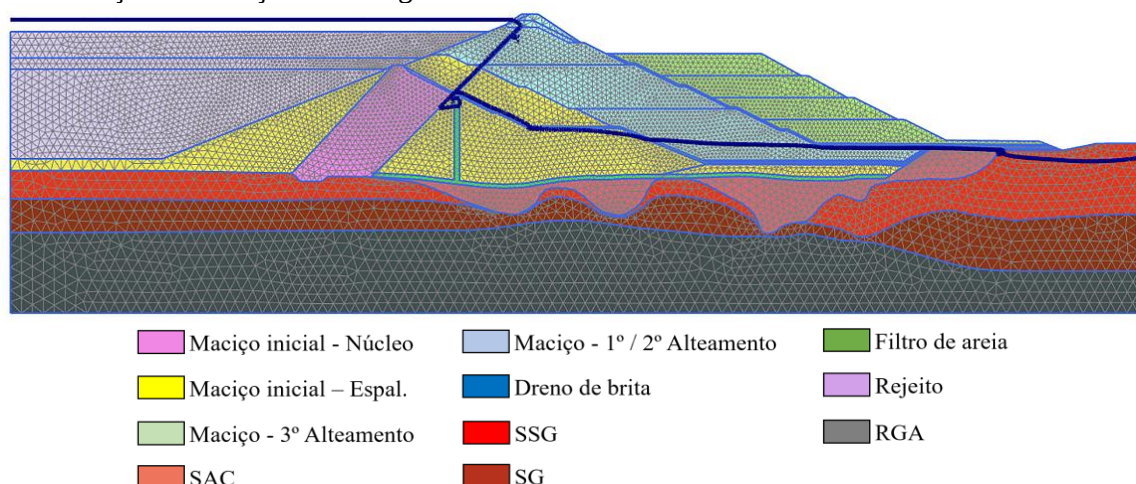


Figura 4. Malha de elementos finitos da Seção A-A (Silva, 2021).



Por meio do modelo numérico simulou-se todas as etapas construtivas da barragem desde sua construção até a dissipação total dos excessos de poropressão gerado pela 3ª Alteamento. Esse tipo de simulação exige que as condições de contorno da análise de percolação sejam alteradas à medida que a barragem sofre novos alteamentos e deposições de rejeito à montante. Portanto, o modelo numérico foi estruturado em etapas intercaladas de construção, estabelecimento de fluxo no regime permanente e adensamento.

A carga hidráulica do reservatório é atualizada a medida que novas camadas de rejeito são depositadas à montante, o que provoca alteração dos caminhos de percolação quando o fluxo em regime permanente é reestabelecido, nas etapas subsequentes.

O objetivo da simulação numérica das etapas construtivas da barragem é estabelecer o estado de tensões inicial do sistema maciço-fundação, que representa o ponto de partida para as avaliações de segurança realizadas neste estudo.

Após o estabelecimento do estado de tensões da barragem no instante do início do 3º alteamento, as condições de contorno hidráulicas do modelo numérico foram calibradas a partir das leituras dos piezômetros e medidores de nível d'água existentes no maciço e na fundação, de forma a reproduzir a rede de fluxo da barragem naquele instante de tempo.

Para a construção das quatro primeiras bancadas do 3º alteamento, adotou-se etapas construtivas do tipo “consolidation”, as quais simulam simultaneamente o acréscimo de carga devido ao peso próprio das camadas e a geração e dissipação dos excessos de poropressão em função do tempo.

Ao final da construção da quarta bancada, quando as poropressões construtivas atingem seu ápice, simulou-se uma etapa de verificação do fator de segurança pelo método *Phi-c Reduction*. Paralelamente os dados de poropressão desta etapa, aqui referenciada como Cenário A, foram importados para o software *Slide 2.0*, onde foram realizadas análises de estabilidade pelo MEL. Em seguida foi simulada no modelo numérico uma etapa de adensamento até a dissipação total dos excessos de poropressão, aqui referenciada como Cenário B, para a qual o procedimento descrito foi repetido.

Ao todo foram efetuadas 82 análises sendo 52 análises determinísticas pelo MEL, 26 análises determinísticas pelo MEF e 4 análises probabilísticas pelo MEL utilizando o método de Monte Carlo.

As análises determinísticas pelos métodos MEL e MEF foram utilizadas para a aplicação do método probabilístico FOSM. Nestas análises a derivada parcial de FS em relação a cada parâmetro ($\delta FS / \delta x_i$) foi definida por meio do coeficiente angular da reta formada pelos valores de FS obtidos a partir de acréscimos e decréscimos de 10 % nos valores médios de cada parâmetro.

Nas análises realizadas por Monte Carlo, adotou-se o método de amostragem Latin Hypercube (Mckay et. al, 1979) com 5.000 amostras aleatórias e algoritmo de busca livre para superfícies de ruptura circulares e poligonais.

5 Resultados

5.1 Influência dos Parâmetros na Probabilidade de Ruptura (FOSM)

A Figura 5 e a Figura 6 apresentam a comparação das influências relativas dos parâmetros para os três métodos considerados no estudo. Nota-se coerência entre os resultados dos métodos de Bishop Simplificado e Morgenstern & Price, tendo o segundo se destacado pela maior influência da coesão do material SSG para o FS. Observa-se também uma redução na influência do ângulo de atrito da camada SAC após a dissipação dos excessos de poropressão. Em contrapartida, a coesão da camada SSG torna-se o parâmetro mais relevante para a variância de FS nesse cenário. Esse fenômeno pode ser explicado pela migração da superfície de ruptura crítica que outrora atravessava a camada SAC, cuja resistência era afetada pelo excesso de poropressão, para a camada SSG, ocorrendo de forma superficial, o que justifica a maior influência da coesão.

Os resultados do método numérico *Phi-c Reduction* destoam dos demais por apresentar distribuição de influências relativas incompatível com as observadas nos métodos de equilíbrio limite. A divergência observada pode estar relacionada com a forma com que os métodos calculam o FS. Enquanto no método de equilíbrio limite o FS é calculado considerando a mobilização total de resistência dos materiais ao longo da superfície de ruptura, o método de elementos finitos considera taxas de mobilização diferenciadas, simulando inclusive a redistribuição de tensões provocada pela plastificação de elementos adjacentes, o que pode induzir a formação zonas de fragilidade no maciço, isto é, zonas de alta mobilização de resistência.

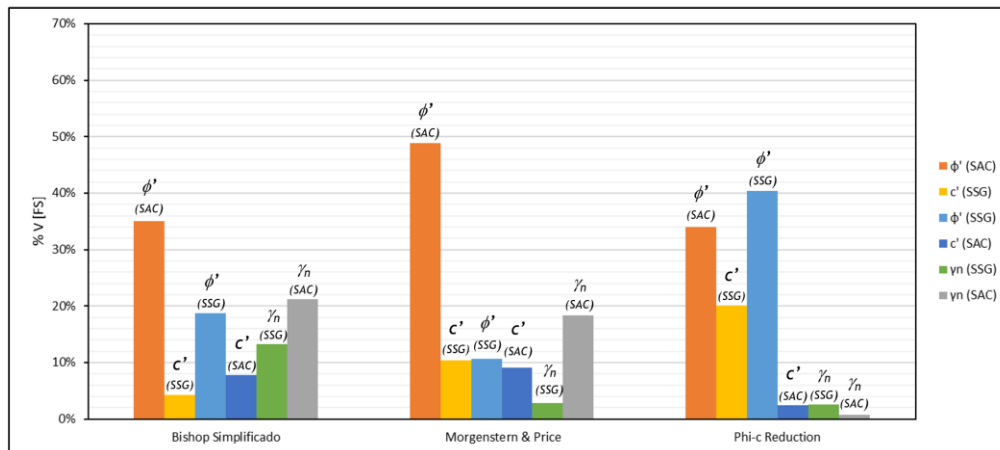


Figura 5. Cenário A – final de construção (Silva, 2021).

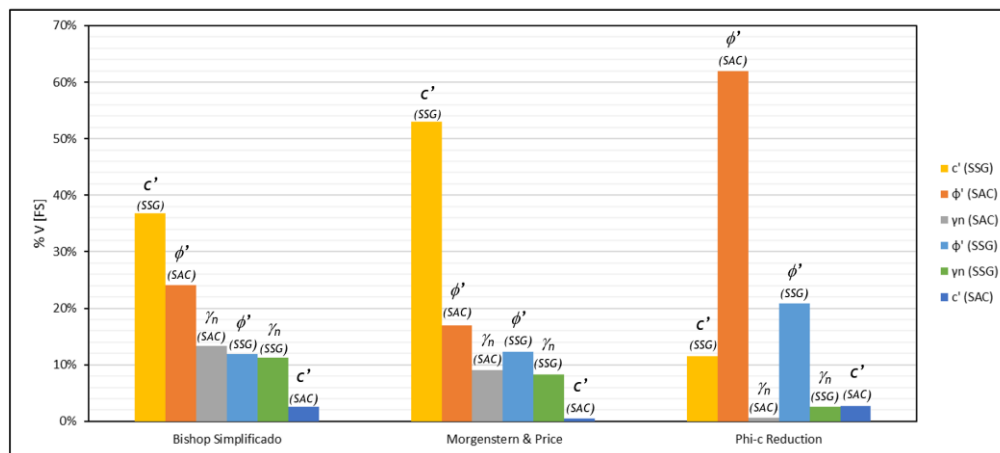


Figura 6. Cenário B – após dissipação de poropressão (Silva, 2021).

5.2 Análise Comparativa dos Resultados

Os resultados obtidos a partir das análises realizadas pelo método FOSM, utilizando MEL e MEF, e pelo método de Monte Carlo pelo MEL, foram comparados e resumidos na Tabela 3 e na Tabela 4, respectivamente.

Tabela 3. Resumo dos resultados das análises probabilísticas pelo Método FOSM (Silva, 2021).

Método FOSM						
Método de estabilidade	Cenário	E [FS]	V [FS]	σ [FS]	β	PR
Bishop Simplificado	Final de construção (A)	1,51	0,017	0,13	3,90	1 : 2,15 x 10 ⁴
	Após dissipação de poropressão (B)	1,64	0,020	0,14	4,47	1 : 2,59 x 10 ⁵
Morgenstern & Price	Final de construção (A)	1,75	0,021	0,15	5,13	1 : 7,09 x 10 ⁶
	Após dissipação de poropressão (B)	1,80	0,025	0,16	5,59	1 : 8,85 x 10 ⁷
Phi-c Reduction	Final de construção (A)	1,66	0,018	0,13	4,87	1 : 1,84 x 10 ⁶
	Após dissipação de poropressão (B)	1,86	0,019	0,14	6,21	1 : 4,02 x 10 ⁹

Tabela 4. Resumo dos resultados das análises probabilísticas pelo Método de Monte Carlo (Silva, 2021).



Método de Monte Carlo (<i>Latin Hypercube</i>)						
Método de estabilidade	Cenário	E [FS]	V [FS]	σ [FS]	β	PR
Bishop Simplificado	Final de construção (A)	1,47	0,015	0,12	3,84	1 : 1,69 x 10 ⁴
	Após dissipação de poropressão (B)	1,56	0,016	0,13	4,42	1 : 2,04 x 10 ⁵
Morgenstern & Price	Final de construção (A)	1,66	0,019	0,14	4,86	1 : 1,75 x 10 ⁶
	Após dissipação de poropressão (B)	1,71	0,017	0,13	5,37	1 : 2,54 x 10 ⁷

Em todas as análises realizadas observa-se uma clara tendência de redução da PR entre o cenário de final de construção (A) e o cenário pós dissipação de poropressão (B). A redução ocorre devido ao ganho de resistência provocado pelo aumento das tensões efetivas na fundação, entre um cenário e outro. Esse fenômeno é particularmente acentuado na análise pelo método Phi-c Reduction, na qual o índice de confiabilidade apresentou aumento de 28 % após a dissipação dos excessos de poropressão, contra uma variação percentual média de 12 % nas demais análises.

Os índices de confiabilidade obtidos pelos métodos Bishop Simplificado e Morgenstern & Price apresentaram variações similares com a alteração da poropressão entre os cenários de análises. Os valores de β obtidos nas análises pelo método de Bishop Simplificado apresentaram, respectivamente pelos métodos FOSM e Monte Carlo, aumento 14 % e 15 %, entre um cenário e outro, contra um aumento de 9 % e 10 %, nas análises pelo Método de Morgenstern & Price.

Nota-se que os valores de PR e β obtidos pelos Métodos de Bishop Simplificado e Morgenstern & Price apresentaram consistência quando comparados entre cenários, embora apresentem valores diferentes quando comparados entre si.

Os valores de PR e β obtidos pelo Método Phi-c Reduction no cenário de final de construção (A), se mostram coerentes com aqueles obtidos pelo Método Morgenstern & Price nas análises FOSM e Monte Carlo. Entretanto, no cenário pós dissipação de poropressão (B), a probabilidade de ruptura sofre redução substancial, destoando dos demais resultados.

Percebe-se que o Método de Bishop Simplificado se mostrou o mais conservador dos três, apresentando fatores de segurança menores e probabilidade de ruptura maiores em todos os cenários analisados.

A Figura 7 ilustra graficamente a comparação dos valores de PR e β , obtidos pelos três diferentes métodos de cálculo de FS, nos dois cenários de análise, pelos dois métodos probabilísticos empregados no estudo.

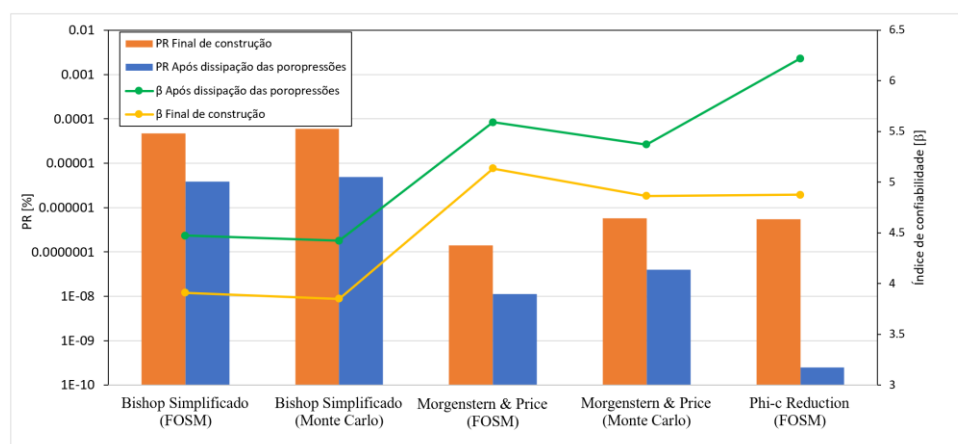


Figura 7. Comparação das probabilidades de ruptura e índices de confiabilidade entre métodos (Silva, 2021).

6 Considerações Finais

As análises realizadas pelo método FOSM permitiram identificar que a influência relativa dos parâmetros incertos na variância do fator de segurança muda após a dissipação dos excessos de poropressão



na fundação. O fenômeno, que foi observado nos três métodos de estabilidade adotados, ocorre devido à mudança de posição da superfície crítica de ruptura após o aumento das tensões efetivas nas camadas antes afetadas pelo excesso de poropressão. O deslocamento das superfícies de ruptura para porções mais superficiais da fundação contribui para o aumento da influência relativa da coesão para a variância do FS.

A influência relativa dos parâmetros para a variância de FS foi impactada pelo elevado grau de incerteza dos interceptos coesivos dos materiais SAC e SSG.

A utilização de um algoritmo de busca livre para as superfícies de ruptura fez com que variações positivas (incrementais) nos parâmetros produzissem efeitos diferentes das variações negativas (decrementais), pois o algoritmo altera a posição das superfícies de ruptura quando ocorrem variações de resistência nos materiais. A migração da superfície de ruptura se mostrou um fator determinante na influência dos parâmetros para a variância do FS no método FOSM.

A heterogeneidade do maciço e da fundação da barragem pode ter contribuído para a frequente alteração de posição da superfície crítica de ruptura nas análises determinísticas efetuadas para aplicação do método FOSM.

A discrepância observada na influência relativa dos parâmetros na variância de FS entre os Métodos de Equilíbrio Limite e o Método *Phi-c Reduction*, ressalta uma diferença relevante entre os métodos. O aumento da mobilização de resistência ao cisalhamento induzido pelas distorções no contato entre materiais com diferentes compressibilidades, induziu a formação de uma zona de fragilidade, na qual se formam pontos plásticos durante o procedimento de redução dos parâmetros de resistência do método *Phi-c Reduction*. Esta plastificação gerou uma zona preferencial para formação das superfícies de ruptura críticas, que ocorrem em padrão progressivo. Tal fenômeno não pode ser reproduzido em análises de equilíbrio limite, pois estas não consideram taxas de mobilização de resistência diferentes ao longo das superfícies de ruptura.

Considerando todos os métodos de cálculo, constatou-se valores de PR entre $1:2,1 \times 10^4$ e $1:7,1 \times 10^7$ no cenário de final de construção e $1:2,0 \times 10^5$ e $1:2,5 \times 10^{10}$ no cenário pós dissipação de poropressão. A grande variabilidade obtida nos resultados entre métodos reforça a importância do método de cálculo na avaliação de estabilidade de uma barragem.

AGRADECIMENTOS

À PUC-Rio por viabilizar a realização deste estudo. À Mineradora Vale pela autorização para utilização dos dados topográficos e resultados de ensaios geotécnicos realizados na barragem. À BVP Geotecnia e Hidrotecnia pela disponibilização dos dados utilizados no estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bishop, A. W. (1955). The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. *Geotechnique*, London, Vol. 5, No.1, pp. 7-17.
- Silva, F. M. (2021). *Avaliação Probabilística da Estabilidade de uma Barragem de Rejeitos*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.
- Google. (2021). *Google Earth website*. Disponível em <https://earth.google.com>. Acesso em: 19 de junho de 2021.
- Morgenstern, N. R., Price, V. E. (1965). The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. *Geotechnique*, Vol.15, No.4, pp. 289-290
- Mckay, M. D., Beckman, R. J. & Conover W. J. (1979). Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *Technometrics*, 21:2, 239-245
- Metropolis, N.; Ulam, S. *The Monte Carlo method*. Journal of the American Statistical Association, v. 44, p. 335–341, 1949.
- Schanz T., Vermeer P.A & Bonnier P.G. (1999). *The Hardening soil model: Formulation and verification*. Beyond 2000 in Computational Geotechnics, Rotterdam, p. 281-290.