

CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



## INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE ESPACIAL DOS PARÂMETROS NO ESTUDO DE ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM DE REJEITO DE FERRO

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.9.26.V-008>

**Breno Hayashi Lucena (\*), Gustavo Ferreira Simões**

\* Universidade Federal de Minas Gerais, hayashibreno@gmail.com

### RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo comparar o método probabilístico convencional e o método probabilístico com variabilidade espacial em análises de estabilidade de barragens de rejeito de ferro. Utilizou-se para tanto, uma geometria típica baseada em uma barragem existente, bem como parâmetros para os materiais encontrados na literatura, tanto valores médios como seus devidos desvios padrão. Foram realizadas três análises para cada método, cada uma com diferentes níveis de água e extensão da praia de rejeitos a partir do talude de montante. Além disso, variou-se, para as análises probabilísticas, os cálculos entre duas opções: *Overall Slope* e *Global Minimum*, já para as análises probabilísticas com variabilidade espacial, optou-se por variar o comprimento de correlação, para obter-se uma maior sensibilidade quanto à influência do mesmo sobre os resultados das análises. Conclui-se que o método probabilístico com variabilidade espacial tende a apresentar resultados menos conservadores que as abordagens probabilísticas usuais, mantendo maior consistência estatística, o que reforça sua relevância em análises de estabilidade. Ressalta-se, contudo, que a adequada definição dos parâmetros, especialmente dos comprimentos de correlação, é essencial, dada sua forte influência nos resultados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Análises Probabilísticas, Barragem de Rejeitos, Estabilidade de Taludes, Variabilidade Espacial.

### ABSTRACT

The objective of this study is to compare the conventional probabilistic method and the probabilistic method with spatial variability in stability analyses of iron tailings dams. A geometry based on an existing dam and material parameters found in the literature was used. Three analyses were conducted for each method, with varying water levels and tailings beach extensions from the upstream slope. Furthermore, for the conventional probabilistic analyses, the calculations were varied with two options: Overall Slope and Global Minimum. In order to analyze the probabilistic models with spatial variability, the correlation length was varied in order to obtain greater sensitivity regarding its influence on the results. It can be concluded that the probabilistic method with spatial variability tends to yield less conservative results than traditional probabilistic approaches, while maintaining greater statistical consistency. This strengthens the relevance of probabilistic methods in stability analyses. It is essential to emphasize, however, that the accurate definition of parameters, particularly correlation lengths, is of paramount importance, given their significant influence on the results.

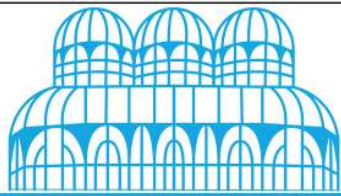
**KEY WORDS:** Probabilistic Analysis, Tailings Dam, Slope Stability, Spatial Variability.

### INTRODUÇÃO

Na engenharia, os cálculos utilizados tendem a ser bastante precisos, mas levam em conta fatores de segurança muitas vezes conservadores, pois dados utilizados nesses cálculos podem sofrer variações inerentes à heterogeneidade dos materiais e ao próprio processo de coleta deles. No caso do solo, além da heterogeneidade, tem-se parâmetros que dependem do local de coleta, equipamentos utilizados, forma de armazenamento e até mesmo do transporte das amostras, o que pode gerar variações significativas de valores em um mesmo solo e, conseqüentemente, imprecisão nos cálculos. No contexto da mineração, tais incertezas são intensificadas, uma vez que o rejeito é um material ainda mais heterogêneo que o solo.

O presente trabalho apresenta um estudo comparativo entre o método probabilístico convencional e o método probabilístico com variabilidade espacial na análise da estabilidade de uma barragem de rejeito de ferro, nos quais foram avaliados os valores de fator de segurança e a probabilidade de falha encontrados, bem como a dispersão





CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade

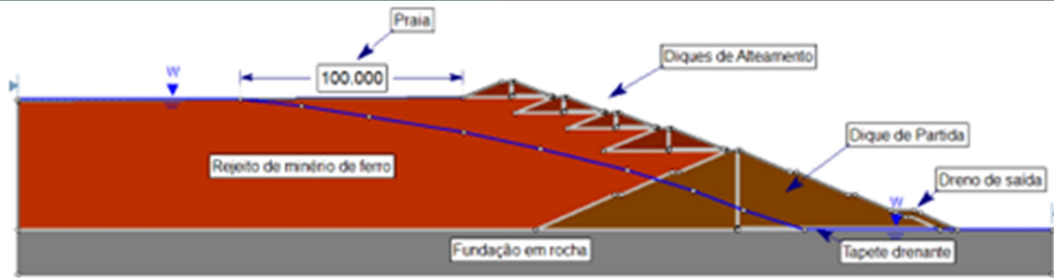


Figura 3: Modelo geotécnico proposto com 100 metros de praia. Fonte: Autores do trabalho.

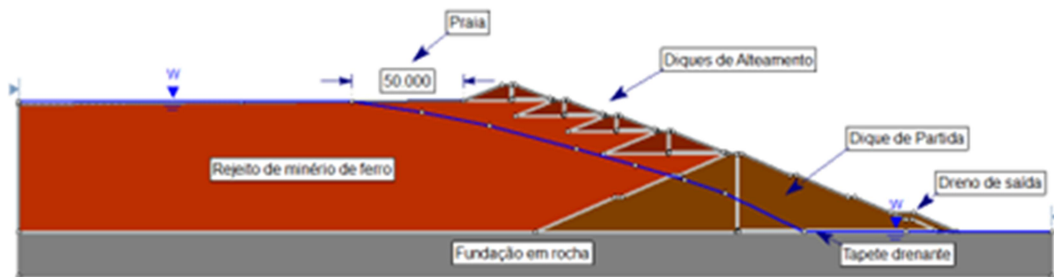


Figura 4: Modelo geotécnico proposto com 50 metros de praia. Fonte: Autores do trabalho.

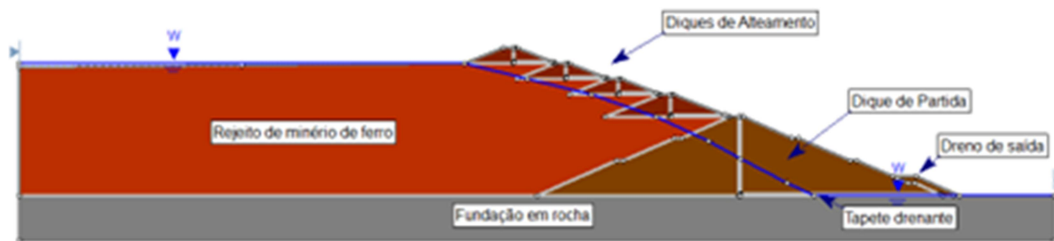


Figura 5: Modelo geotécnico proposto sem praia de rejeitos. Fonte: Autores do trabalho.

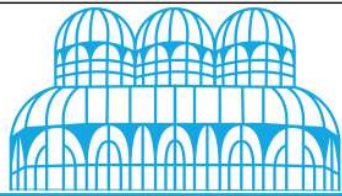
Para a caracterização dos materiais que compõem a estrutura hipotética, utilizou-se uma combinação de valores encontrados na literatura, mais especificamente, os valores compilados por Souza (2018) e os valores médios dos coeficientes de variação recomendados por Assis *et al.* (2011), como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros utilizados nas análises. Fonte: Adaptado de Souza (2018), Assis *et al.* (2011).

Material	$\gamma$ – Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )		$c'$ – Coesão (kPa)		$\phi'$ – Ângulo de atrito (°)	
	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
Dique de Partida	17,5	-	29,0	-	28,0	-
Dique de Alteamento	20,0	-	5,0	-	35,0	-
Rejeito	20,8	0,6	11,0	4,4	32,0	3,2
Tapete Drenante	23,0	-	0,0	-	35,0	-
Fundação em Rocha	23,0	-	Resistência Infinita			

Para as análises probabilísticas convencionais utilizou-se o programa *Slide 7.0*, enquanto para as análises probabilísticas com variabilidade espacial utilizou-se a versão *Slide 2018*, da RocScience Inc.

Para as análises probabilísticas convencionais, utilizou-se o Método de Monte Carlo (MMC) com um total de 10000 iterações. Como destacado por Pimentel *et al.* (2017), os programas comerciais de análise de estabilidade de taludes oferecem duas opções para a realização das análises probabilísticas pelo MMC: *Overall Slope* e *Global Minimum*.



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026



Para a opção *Overall Slope*, para cada iteração realizada com um conjunto de valores para os parâmetros do material, determina-se uma superfície de ruptura crítica e um novo Fator de Segurança (FS). Como em cada iteração procura-se uma nova superfície crítica, este método exige um grande esforço computacional, com análises que podem demorar horas ou até mesmo dias para serem completadas.

Já para a opção *Global Minimum*, encontra-se inicialmente a superfície de ruptura crítica ao utilizar-se os valores médios para os parâmetros, como em uma análise determinística. Em seguida, são variados os valores dos parâmetros e calcula-se o FS para cada iteração, considerando somente a superfície crítica obtida com os valores médios.

Segundo RocScience (2019), a análise com variabilidade espacial é uma variedade da análise probabilística, que permite que o usuário simule as variações dos parâmetros do solo dentro da própria massa. Ao contrário da análise probabilística tradicional, que varia o valor do parâmetro para todo o maciço, na análise com variabilidade espacial é gerado um campo de valores aleatórios, baseado também nos parâmetros de comprimentos de correlação (*correlation length parameters*).

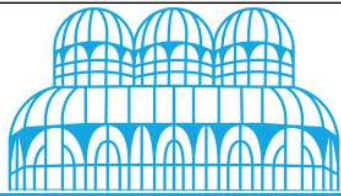
O comprimento de correlação representa a distância dentro de um material na qual a variável aleatória espacial é tida como altamente correlacionada, ou seja, similar em magnitude. Pequenos valores de comprimento de correlação indicam que as propriedades do solo variam bruscamente ao longo da massa, enquanto valores mais elevados indicam uma variação mais suave. Se os valores de comprimento de correlação forem iguais nos eixos X e Y, o campo de valores aleatórios gerado será isotrópico.

Os solos normalmente possuem uma certa heterogeneidade, portanto, um método de análise que tenta simular essa variabilidade deveria fornecer valores mais realistas para o FS e a Probabilidade de Falha (PF). Percebe-se que em taludes com FS maior que 1, análises com variabilidade espacial tendem a fornecer menores PF em relação a análises sem variabilidade espacial. A análise probabilística tradicional geralmente resulta em PF não realística e demasiadamente conservadora.

Como recomendado por RocScience (2019), utilizou-se o Método Hipercubo Latino (MHL) nas análises com variabilidade espacial. Optou-se pelo número de 2000 amostras para cada um dos níveis d'água em estudo e três relações diferentes para os comprimentos de correlação X e Y para os parâmetros coesão, ângulo de atrito e peso específico do rejeito. RocScience (2019) também ressalta que a variação de parâmetros em solos tende a ser significativamente maior no eixo vertical, como exemplo, uma diferença na ordem de 10 vezes. Para tanto, os valores escolhidos tomaram como base uma diferença de 10 vezes entre os valores do comprimento de correlação para os eixos X e Y. Foram utilizados os seguintes pares: 10 metros em X e 1 metro em Y, 50 metros em X e 5 metros em Y e 200 metros em X e 20 metros em Y.

Como exemplo dos campos de valores aleatórios gerados a partir dos diferentes comprimentos de correlação utilizados, são apresentados a seguir os campos do parâmetro coesão, para a situação de 100 metros de praia em uma das 2000 amostras existentes na análise probabilística com variabilidade espacial.

A **Figura 6** apresenta a distribuição espacial do parâmetro coesão para comprimentos de correlação iguais a 1 metro no eixo Y e 10 metros no eixo X.



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade

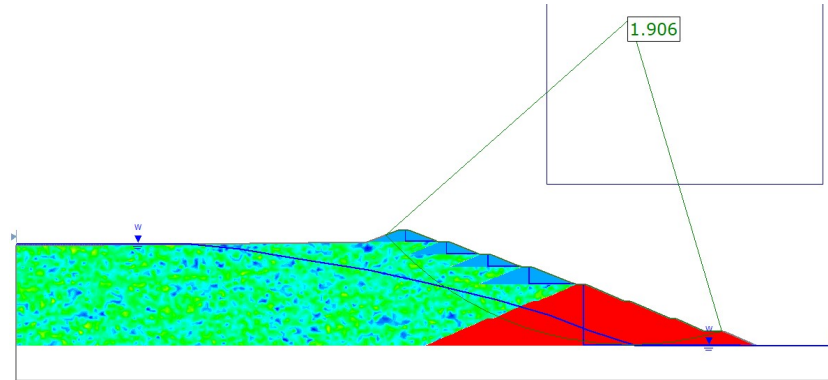


Figura 6: Exemplo da distribuição da coesão na barragem com 100 metros de praia (Y=1,0m e X=10,0m). Fonte: Autores do trabalho.

A Figura 7 apresenta a distribuição espacial do parâmetro coesão para comprimentos de correlação iguais a 5 metros no eixo Y e 50 metros no eixo X.

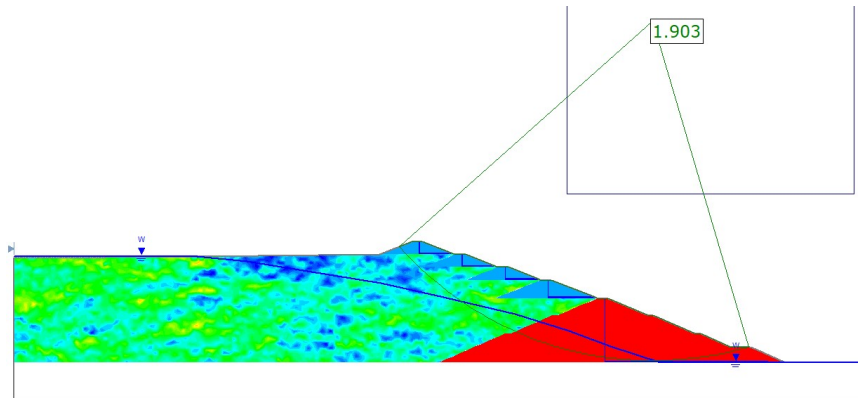


Figura 7: Amostra da distribuição da coesão na barragem com 100 metros de praia (Y=5,0m e X=50,0m). Fonte: Autores do trabalho.

A Figura 8 apresenta a distribuição espacial do parâmetro coesão para comprimentos de correlação iguais a 20 metros no eixo Y e 200 metros no eixo X.

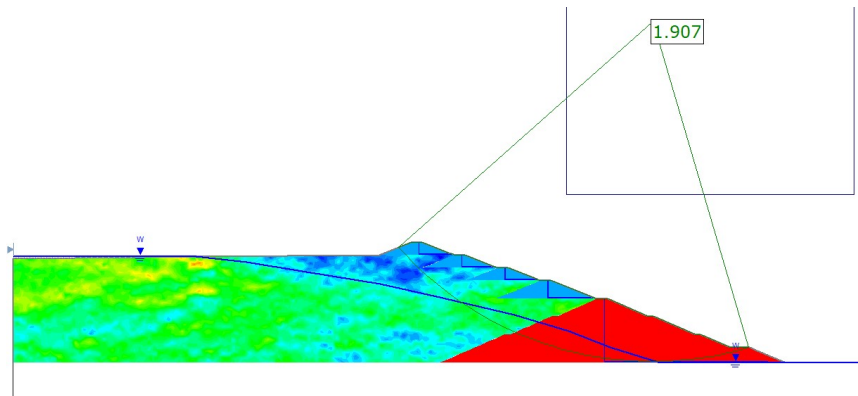
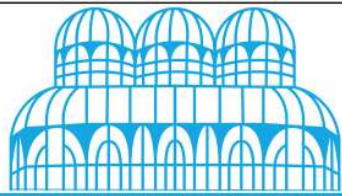


Figura 8 – Amostra da distribuição da coesão na barragem com 100 metros de praia (Y=20,0m e X=200,0m). Fonte: Autores do trabalho.



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



## RESULTADOS

Todos os valores de FS estão baseados no método de Spencer, uma vez que estes pouco variaram em relação aos valores encontrados pelo método de Morgenstern-Price e as análises foram realizadas supondo-se um carregamento drenado.

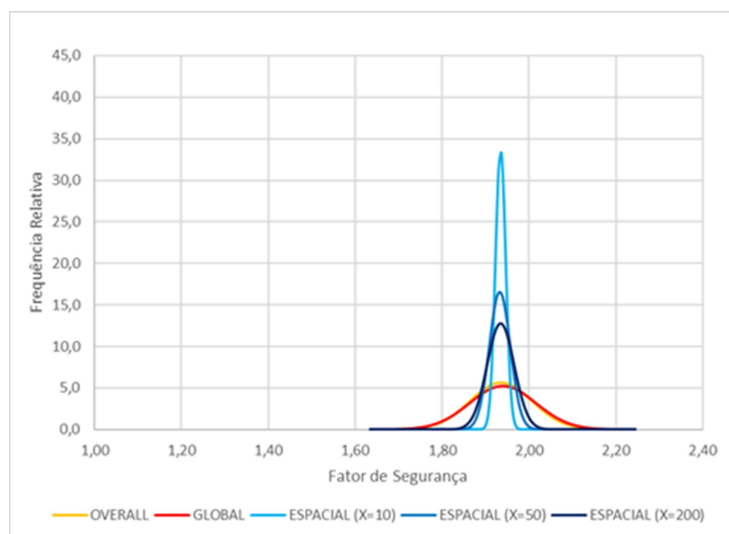
De maneira geral, observa-se que as análises demonstraram forte tendência de queda nos valores referentes ao FS à medida que ocorreu o avanço da linha freática da praia de rejeito, em direção ao eixo da barragem. Ao englobar uma maior porção de rejeito do maciço, a linha freática aumenta a poropressão no solo e, conseqüentemente, reduz sua estabilidade.

Como descrito anteriormente, para as análises probabilísticas convencionais, utilizou-se o MMC com 10000 iterações. Segundo os gráficos de convergência relativos às análises, foi possível afirmar que houve uma convergência satisfatória com o número de iterações escolhido, portanto não foram necessárias análises com maior número de amostras.

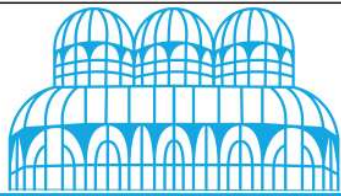
Como descrito anteriormente, para as análises probabilísticas com variabilidade espacial, utilizou-se o MHL com 2000 iterações. Segundo os gráficos de convergência relativos às análises, foi possível afirmar que houve uma convergência satisfatória com o número de iterações escolhido, portanto não foram necessárias análises com maior número de amostras.

Para todas as análises foram obtidos valores que podem ser considerados altos para o FS e baixos para a PF, o que confirma a estabilidade da geometria ao considerar-se os parâmetros utilizados neste estudo. Para as análises com variabilidade espacial, foram obtidos valores médios para o FS próximos aos valores encontrados pelas análises probabilísticas, porém os valores de desvios padrão são bastante reduzidos. Tal fato pode ser mais bem visualizado nas representações gráficas a seguir: a **Figura 9** apresenta os dados das análises de estabilidade para a barragem com 100 metros de praia, a **Figura 10** para a barragem com 50 metros de praia e a **Figura 11** para a barragem sem praia de rejeitos.

É possível perceber que ao aumentar-se os comprimentos de correlação nas análises probabilísticas com variabilidade espacial obtém-se gráficos mais semelhantes aos das análises probabilísticas sem essa variabilidade, como já se esperava. Supõe-se que essa redução do desvio padrão ao diminuir-se os comprimentos de correlação se deve ao aumento de amostras para uma mesma iteração, ou seja, em uma mesma análise de estabilidade, a mesma cunha de ruptura atravessaria uma maior quantidade de subdivisões teóricas do material, o que resultaria em mais amostras para cada parâmetro e, conseqüentemente, em uma análise mais precisa.



**Figura 9: Distribuições estatísticas dos FS da barragem com 100 metros de praia. Fonte: Autores do trabalho.**



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade

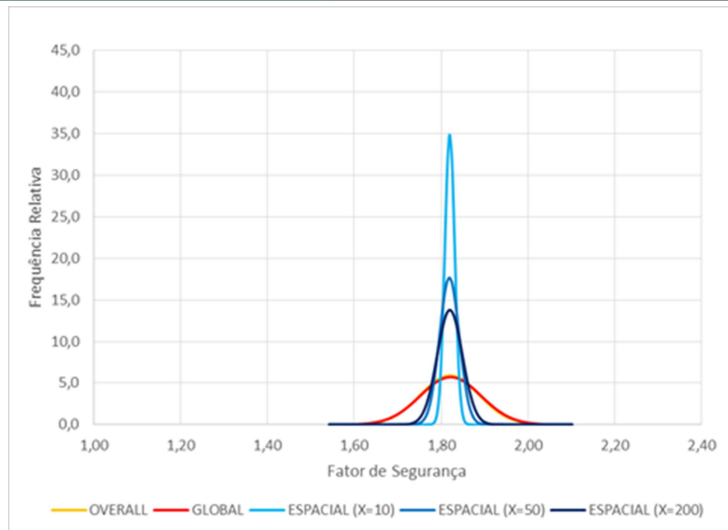


Figura 10: Distribuições estatísticas dos FS da barragem com 50 metros de praia. Fonte: Autores do trabalho.

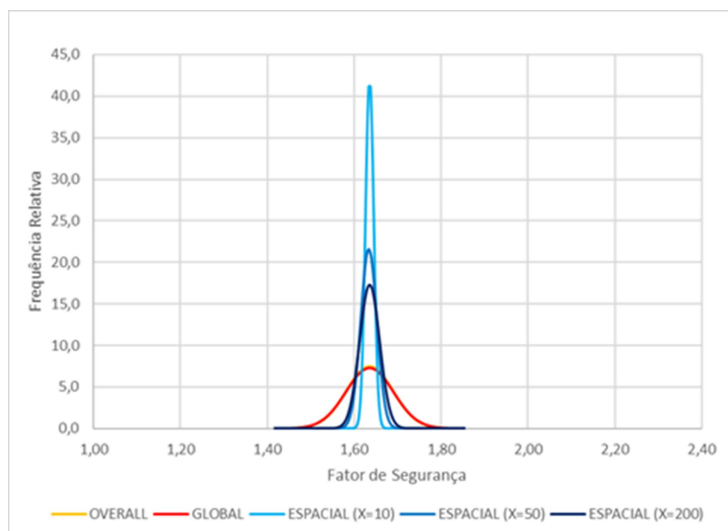


Figura 11: Distribuições estatísticas dos FS da barragem sem praia de rejeitos. Fonte: Autores do trabalho.

A Figura 12 apresenta uma cunha de ruptura e divisão espacial do rejeito fictícios. Tem-se a representação de dois pares de comprimentos de correlação: um menor, representado pelos quadros azuis, e outro maior, representado pelos quadros verdes, equivalentes a uma área de 4x4 quadros azuis. Nota-se que a mesma cunha de ruptura atravessa 6 quadros verdes e 21 quadros azuis, o que reforça a suposição de que um comprimento de correlação reduzido resulta em um número mais elevado de amostras e, portanto, uma análise estatística mais precisa.

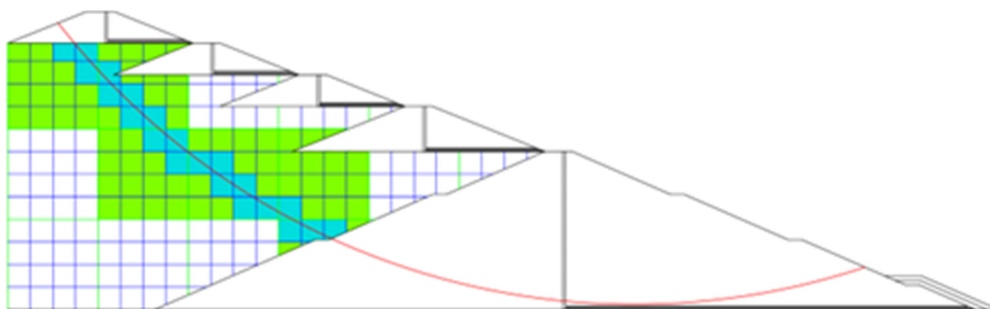
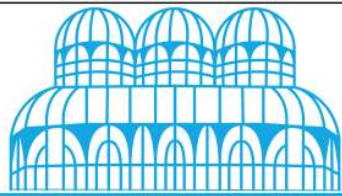


Figura 12: Variação do número de amostras dada pela variação dos comprimentos de correlação. Fonte: Autores do trabalho.



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



## CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo comparar o método probabilístico e o método probabilístico com variabilidade espacial em análises de estabilidade de barragens de rejeito de ferro. A partir das análises realizadas, pode-se concluir que o método probabilístico com variabilidade espacial apresenta resultados, de maneira geral, menos conservadores que as análises probabilísticas mais usuais e, ao mesmo tempo, mais confiáveis estatisticamente. Destaca-se aqui, o grande valor deste tipo de análise. Porém, deve-se ressaltar que, assim como em qualquer análise de estabilidade, a escolha dos parâmetros é de extrema importância e, neste caso, deve-se também encontrar valores para os comprimentos de correlação mais condizentes com a realidade, visto que a variação deles influencia fortemente os resultados encontrados.

Recomenda-se a realização de simulações envolvendo situações não abordadas neste trabalho, como por exemplo, um estudo no qual o rejeito possua um perfil ainda heterogêneo, porém distribuído de forma laminar, ao invés da heterogeneidade aleatória abordada neste estudo. Tais simulações representariam de forma mais realista o lançamento e deposição do rejeito em camadas, com variações aleatórias do número e da espessura das camadas.

Recomenda-se também o estudo do efeito de rupturas progressivas entre as fatias de uma cunha de ruptura, para simular-se assim, uma ruptura por liquefação. É possível que em uma análise de estabilidade encontre-se um talude globalmente estável, porém com fatias instáveis que gradualmente podem gerar a instabilidade global.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSIS, A.P., ESPÓSITO, T.J., GARDONI, M.G., MAIA, J.A.C. (Universidade de Brasília). **Métodos Estatísticos e Probabilísticos Aplicados a Geotecnia**. Brasília: UnB, 2011.
2. COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **Barragens de rejeitos no Brasil**. Organizador: Joaquim Pimenta de Ávila. Brasília/Belo Horizonte: Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB) / Pimenta de Avila Consultoria LTDA, 2012.
3. PIMENTEL, K.C.A., SOUZA, T.C., CAMPELLO, I., ALFENAS, P. **Avaliação dos Métodos Probabilísticos Aplicados à Estabilidade de Taludes de Barragens**. In: XXXI Seminário Nacional de Grandes Barragens - SNGB, 2017, Belo Horizonte. Anais. Belo Horizonte: SNGB, 2017.
4. ROCSCIENCE INC.. **Tutorial 33: Spatial Variability**. Disponível em: <<https://www.rocscience.com/help/slide2/documentation/slide-model/project-settings/statistics/spatial-variability/>>. Acesso em 22 fev. 2019
5. SOUZA, T.C. **Metodologia de Avaliação de Liquefação em Barragens de Rejeito: Uma Abordagem Probabilística**. 2018. 293 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.