XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/94

Influência do modelo de dimensionamento e variabilidade dos parâmetros na segurança de pilhas de estéril

Marcos Túlio Fernandes
Professor, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Curvelo, Brasil, marcostfer@cefetmg.br

Glaucimar Lima Dutra Fernandes
Pós-graduanda em Engenharia Geotecnia, Prominas, Montes Claros, Brasil, dutra.gal@gmail.com

RESUMO: Pilhas de estéril são estruturas que têm a finalidade de depósito de materiais provenientes da mineração que não possuem valor agregado. A variabilidade dos parâmetros geotécnicos dessas estruturas é muito grande, refletindo em grande incerteza nas análises de estabilidade. A estabilidade dessas estruturas pode ser avaliada utilizando modelos de dimensionamento baseados no critério de tensões admissíveis, abordagem tradicional, utilizando critérios de fatores de segurança parciais ou através de modelos probabilísticos. Posto isto, nesta pesquisa buscou-se avaliar qual a influência desses modelos de dimensionamento na confiabilidade de pilhas de estéril. Para isso, foram realizadas análises de estabilidade da seção de uma pilha de estéril utilizando esses modelos no programa Slide 2D. Os resultados demonstraram que a aplicação da abordagem de dimensionamento utilizando os fatores parciais do Eurocode pode resultar em um subdimensionamento da pilha, caso não seja considerado um ajuste dos fatores parciais em função das características das ações que atuam na estrutura. Os resultados com a aplicação de fatores parciais ajustados em função das ações mostraram-se mais coerentes com os das análises probabilísticas, quando comparados com a abordagem tradicional, em razão de os fatores parciais terem ligação direta com o índice de confiabilidade e com a variabilidade dos parâmetros de resistência.

PALAVRAS-CHAVE: Confiabilidade de Estruturas Geotécnicas, Análises de Estabilidade, Dimensionamento de Pilhas.

ABSTRACT: Stockpile are structures intended for the deposition of materials from mining activities that have no added value. The variability of the geotechnical parameters of these structures is very high, resulting in significant uncertainty in stability analyses. The stability of these structures can be assessed using design models based on the allowable stress criterion, the traditional approach, by applying partial safety factor criteria, or through probabilistic models. In this context, this research aimed to evaluate the influence of these design models on the reliability of stockpile. To this end, stability analyses of the section of a stockpile were carried out using these models in the Slide 2D software. The results showed that applying the design approach with Eurocode partial factors may lead to underdesign of the pile if adjustments to the partial factors are not considered according to the characteristics of the actions acting on the structure. The results obtained with the application of partial factors adjusted according to the actions proved to be more consistent with those of probabilistic analyses, when compared with the traditional approach, since partial factors are directly linked to the reliability index and to the variability of resistance parameters.

KEYWORDS: Reliability of Geotechnical Structure, Stability Analyses, Design of stockpile.

1 INTRODUÇÃO

No processo de exploração mineral, é necessária a implantação de estruturas cuja finalidade é armazenar os resíduos provenientes do beneficiamento do minério ou materiais que não possuem valor agregado, como, por exemplo, o estéril.

Dentre os métodos mais comuns para disposição do estéril, encontra-se a disposição em pilhas. Os projetos de pilhas de estéril são desenvolvidos seguindo as recomendações presentes na ABNT NBR

13029:2024. Entre os requisitos que essas estruturas devem atender, um deles está relacionado à estabilidade. A geometria operacional e final da pilha deve ser definida de forma a conduzir a fatores de segurança mínimos, conforme estabelecido pela ABNT NBR 13029:2024.

Geralmente, os fatores de segurança são definidos por meio de uma análise determinística, na qual se comparam as tensões cisalhantes mobilizadas com a resistência ao cisalhamento do material que constitui o talude. Caso a razão entre a tensão cisalhante mobilizada e a resistência ao cisalhamento seja igual a 1, o talude encontra-se em iminência de ruptura (GERSCOVICH *et al*., 2023). Contudo, recentemente houve uma demanda crescente por análises probabilísticas. Nessas análises, não se trabalha com o valor mais provável do parâmetro de resistência, mas sim com uma curva de densidade de probabilidade do parâmetro, realizando simulações que variam os parâmetros conforme sua distribuição de probabilidade. Segundo Gibson (2011), quando há incerteza em relação aos parâmetros de resistência dos materiais, uma abordagem probabilística é mais apropriada do que uma determinística.

Outra abordagem de projeto é a baseada na aplicação de fatores parciais. Diferentemente da abordagem convencional, nos projetos baseados em fatores parciais aplicam-se fatores de majoração das ações e fatores de minoração da resistência (AOKI, 2008). Esse tipo de abordagem de projeto é trazido pela Eurocode EN 1997-1:2004.

Devido às diversas abordagens que podem ser aplicadas no projeto de pilhas de estéril, este artigo tem por objetivo analisar como cada uma delas pode impactar na condição de segurança de uma pilha. Para essa avaliação, foi definida uma seção padrão, comumente encontrada em projetos de pilhas de estéril, e realizadas análises de estabilidade nessa seção utilizando a abordagem determinística tradicional e a aplicação de fatores parciais, seguindo as recomendações da EN 1997-1:2004. Em razão da grande variabilidade dos parâmetros de resistência que podem apresentar os estéreis, também foram realizadas análises probabilísticas, a fim de avaliar como essa variabilidade pode impactar na segurança da estrutura.

2 ABORDAGEM DE DIMENSIONAMENTO BASEADA NO EUROCODE 7

Na avaliação da estabilidade de taludes, é comumente empregado o conceito de tensão ou resistência ao cisalhamento admissível que pode atuar na estrutura. Nessa abordagem de dimensionamento, os esforços atuantes devem ser iguais ou inferiores à resistência característica do material, dividida por um fator de segurança, conforme a Equação 01. O fator de segurança a ser aplicado depende do tipo de estrutura que se pretende dimensionar, sendo, no caso da estabilidade de pilhas de estéril, definido pela ABNT NBR 13029:2024.

$$E_k \leq \frac{R_k}{FS} \tag{1}$$

E_k: esforços solicitantes;
R_k: resistência característica a determinado esforço;
FS: fator de segurança.

Outra abordagem de dimensionamento sugerida pela EN 1997-1:2004 é a baseada na aplicação de fatores de segurança parciais. Nessa abordagem, as ações e resistência de cálculo são função da aplicação de fatores parciais às ações, esforços e à resistência do material, conforme exemplificado nas Equações 2, 3 e 4. A condição de segurança da estrutura é validada quando o fator de segurança é maior do 1.

$$E_d = R_d \tag{2}$$

$$E_d = E\left\{\gamma_F \,.\, F_{rep}; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d\right\} \tag{3}$$

$$R_d = R\left\{\gamma_F \,.\, F_{rep}; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d\right\} / \gamma_R \tag{4}$$

Sendo:
E_d: valor de projeto da ação;
R_d: valor de projeto da resistência a uma ação;
F_{rep}: valor representativo das ações;
X_k: valor característico das propriedades dos materiais;
a_d: valor de projeto de dados geométricos;
γ_F: fator parcial aplicado a ação, ver Tabela 1;
γ_M: fator parcial aplicado ao material, ver Tabela 1;
γ_R: Fator parcial aplicado a resistência, no caso de estabilidade de taludes igual a 1.

Dentro dessa perspectiva, a EN 1997-1:2004 apresenta três abordagens de projeto: DA 1, DA 2 e DA 3, nas quais o que se altera entre elas são as combinações de ações que devem ser aplicadas. Conforme destacado por Lansivaara e Poutanen (2013), a abordagem de projeto aplicada com maior consenso no meio geotécnico para a estabilidade de taludes é a DA 3, em que as combinações de ações podem ser vistas na Equação 5.

$$Combinação: A2 + M2 + R3 \quad (5)$$

Tabela 1. Fatores parciais aplicados as ações e ao material, adaptado de EN 1997-1:2004.

Ação			Material	
Tipo		A2	Tipo	M2
Permanente	Não favorável	1,00	Ângulo de atrito*	1,25
	Favorável	1,00	Coesão efetiva	1,25
Variável	Não favorável	1,30	Resistência ao cisalhamento não drenada	1,40
	Favorável	0,00	Resistência não confinada	1,40
			Peso específico	1,00

*Este fator é aplicado na tan φ

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Modelo geológico-geotécnico da pilha

Nesta pesquisa, as análises de estabilidade foram realizadas no software Slide 2D, da fabricante Rocscience. Esse software permite avaliar a estabilidade considerando normas de projeto de outros países, como, por exemplo, o Eurocode 7, com a aplicação de fatores parciais.

Para a realização dessa análise, foi construída uma seção hipotética de uma pilha com altura de 240 metros na seção mais crítica, além de bermas com altura e largura de 10 metros. A inclinação dos taludes assumida nesta análise foi de 1/2. Essas dimensões estão próximas às adotadas por Cezar *et al*. (2025).

Na seção, foram considerados apenas dois materiais: o material da pilha de estéril e uma fundação em quartzito. O nível d'água adotado na análise encontra-se acima do contato da pilha com a fundação. O modelo da pilha pode ser visto na Figura 1.

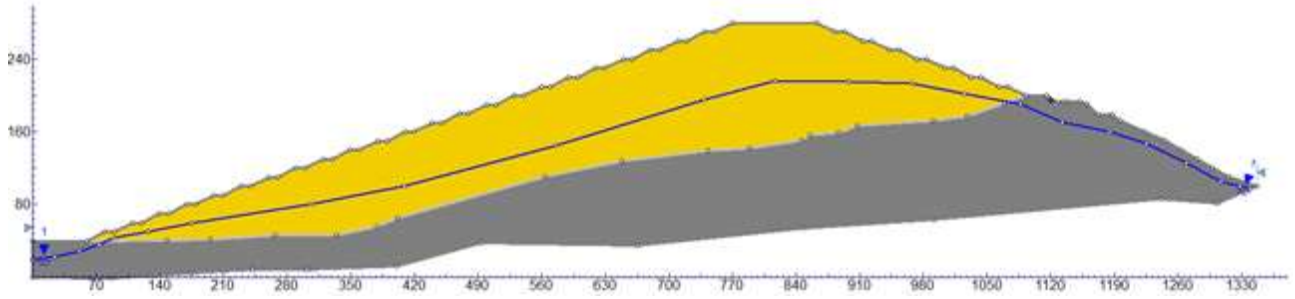


Figura 1. Seção geológica-geotécnica da pilha utilizada nas análises.

3.2 Parâmetros geotécnicos aplicados nas análises

Para compor as análises de estabilidade e probabilísticas, foram aplicados os parâmetros geotécnicos apresentados na Tabela 2. Nas análises realizadas com o objetivo de verificar o impacto da aplicação de fatores parciais aos parâmetros de resistência dos materiais no fator de segurança, foram empregados apenas os valores médios. Já nas análises probabilísticas, foram utilizados os valores médios, o desvio padrão e os valores máximos e mínimos relativos, que correspondem aos valores extremos apresentados na tabela menos o valor médio.

Tabela 2. Resumos dos parâmetros geotécnicos aplicados nas análises

Estéril					
Parâmetro	Valor médio	CV (%)	σ	Valor mínimo	Valor Máximo
Coesão (kPa)	5,00	50,00%	2,50	0,00	10,00
Ângulo de atrito (°)	28,00	10,00%	2,80	22,40	33,60
Peso específico (kN/m²)	20,00	-	-	-	-
Fundação Quatzito					
Parâmetro	Valor médio	CV (%)	σ	Valor mínimo	Valor Máximo
Coesão (kPa)	28,00	50,00%	14,00	18,00	50,00
Ângulo de atrito (°)	33,00	10,00%	3,30	30,00	43,00
Peso específico (kN/m²)	20,72	-	-	-	-

Os parâmetros de resistência do estéril foram extraídos do trabalho de Cezar *et al*. (2025), e os da fundação em quartzito de um dos ensaios de cisalhamento direto apresentados no trabalho de Silva (2006). Para a determinação dos parâmetros que representam a curva de distribuição de probabilidade dos parâmetros de resistência, foi adotado um dos métodos citados por Duncan (2000). Inicialmente, foi adotado um coeficiente de variação de 50% para a coesão e de 10% para o ângulo de atrito, valores compreendidos nos intervalos sugeridos por Sandroni e Sayão (1992), Harr (1984) e Kulhawy (1992) *apud* Duncan (2000). Posteriormente, foram calculados os desvios padrão em função do coeficiente de variação e do valor médio. Os valores máximos e mínimos foram definidos considerando duas vezes o desvio padrão em relação à média. Para o material de fundação em quartzito, os valores máximos e mínimos foram limitados aos valores indicados por Souza *et al*. (2024), para quartzitos do Quadrilátero Ferrífero.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Comparação dos fatores de segurança obtidos aplicando as duas abordagens de dimensionamento

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados obtidos dos fatores de segurança das análises realizadas considerando a Abordagem 01, em que se avalia o fator de segurança tradicional, e a Abordagem 02, aplicando

os fatores parciais da EN 1997-1:2004.

Tabela 3. Compilação dos resultados dos fatores de segurança obtidos.

Análise		FS Bishop	FS Spencer	FS Morgenstern-Price
Abordagem 01 – FS Tradicional	Entre bermas	1,50	1,50	1,50
	Talude da direita	1,27	1,27	1,27
	Talude da esquerda	1,52	1,52	1,52
Abordagem 02 – Eurocode	Entre bermas	1,20	1,20	1,20
	Talude da direita	1,01	1,02	1,02
	Talude da esquerda	1,21	1,21	1,21

Por meio dessas análises, é possível observar que os fatores de segurança obtidos na Abordagem 01 para uma ruptura entre bermas e do talude da direita satisfazem o exigido pela ABNT NBR 13029:2024, que estabelece o valor de 1,50 para ruptura global e entre bermas na condição definitiva. No entanto, o talude da direita apresenta um fator de segurança de 1,27, inferior ao recomendado, sendo a superfície de ruptura localizada em uma porção da pilha composta pelo material da fundação, conforme ilustrado na Figura 2a.

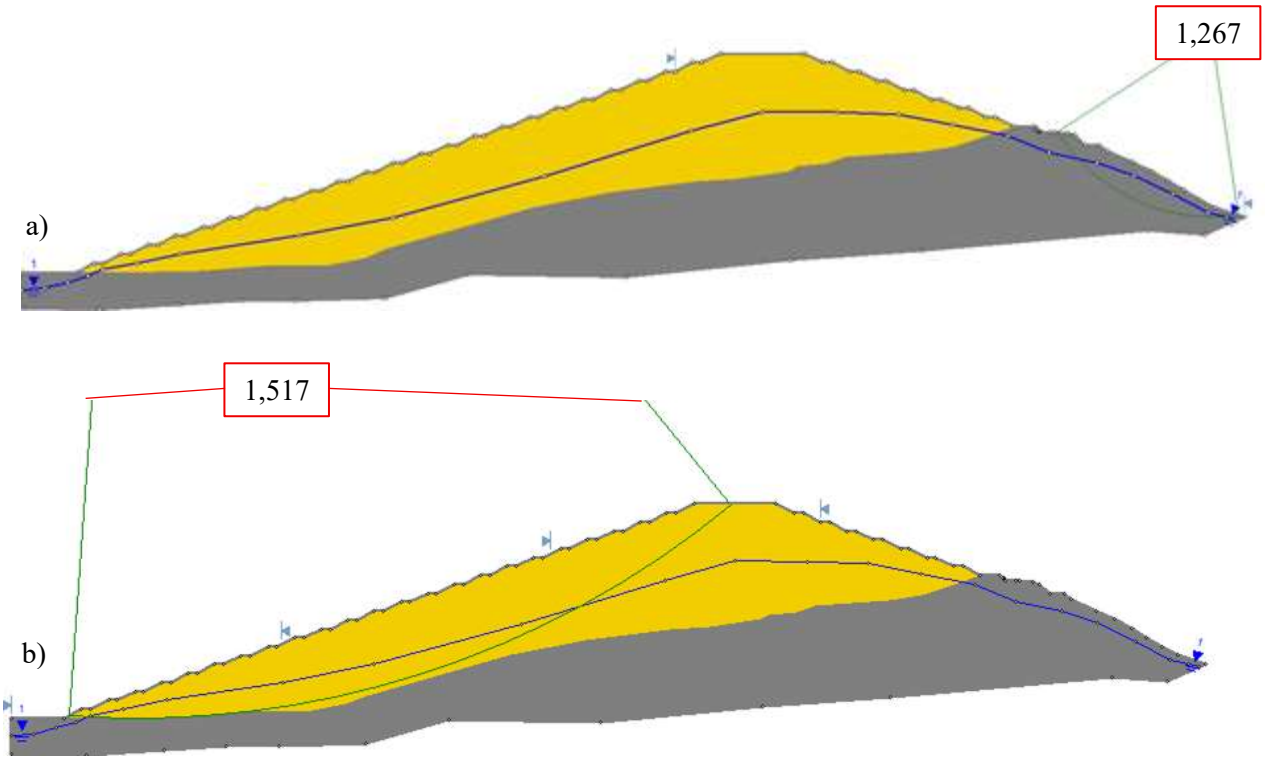


Figura 2. Análises de estabilidade realizadas, Abordagem 1.

Ao analisar os resultados obtidos com a aplicação dos fatores parciais (Abordagem 02), apresentados na Tabela 3, observa-se que todas as análises convergem para um resultado satisfatório, ou seja, a obtenção de um fator de segurança acima de 1. Isso ocorre porque, como os carregamentos atuantes são exclusivamente devido ao peso próprio da estrutura, o fator parcial de majoração das ações é igual a 1. Assim, o único fator parcial atuante é o relacionado aos parâmetros dos materiais, que é de 1,25 para a coesão e o ângulo de atrito, reduzindo o fator tradicional de 1,507, obtido na análise do talude da esquerda, para 1,21.

Essa condição também foi observada por Lansivaara e Poutanen (2013), que relataram que, em situações em que não há ações variáveis influenciando a estabilidade do maciço, a adoção de fatores parciais apenas nos parâmetros dos materiais pode conduzir a resultados menos conservadores. Como nas pilhas de estéril os principais carregamentos decorrem do peso próprio do material, a aplicação dos coeficientes presentes na EN

1997-1:2004 no projeto dessas estruturas pode resultar em valores que não atendam às recomendações normativas nacionais da ABNT NBR 13029:2024.

4.2 Avaliação dos fatores de segurança ajustando os fatores parciais

No trabalho apresentado por Lansivaara e Poutanen (2013), foi definida uma relação entre o fator parcial relacionado ao material (γ_M) e a razão entre as ações variáveis e as ações totais que atuam na estrutura (Q/(G+Q)) para diversos valores de índice de confiabilidade alvo. Para a condição em que o índice de confiabilidade alvo é de 3,80, valor recomendado para situações de projeto comuns segundo a EN 1990:2002, e a razão entre as ações é igual a 0, situação em que não há ação variável, o valor do coeficiente γ_M é 1,72, considerando uma incerteza igual a 0,1. Esse fator parcial corresponde a um coeficiente de variação do material de 10%, igual ao adotado para o ângulo de atrito, parâmetro que mais influencia na estabilidade do estéril. Posto isso, foi realizada uma nova análise considerando esse valor de fator parcial, cujos resultados podem ser vistos na Figura 3.

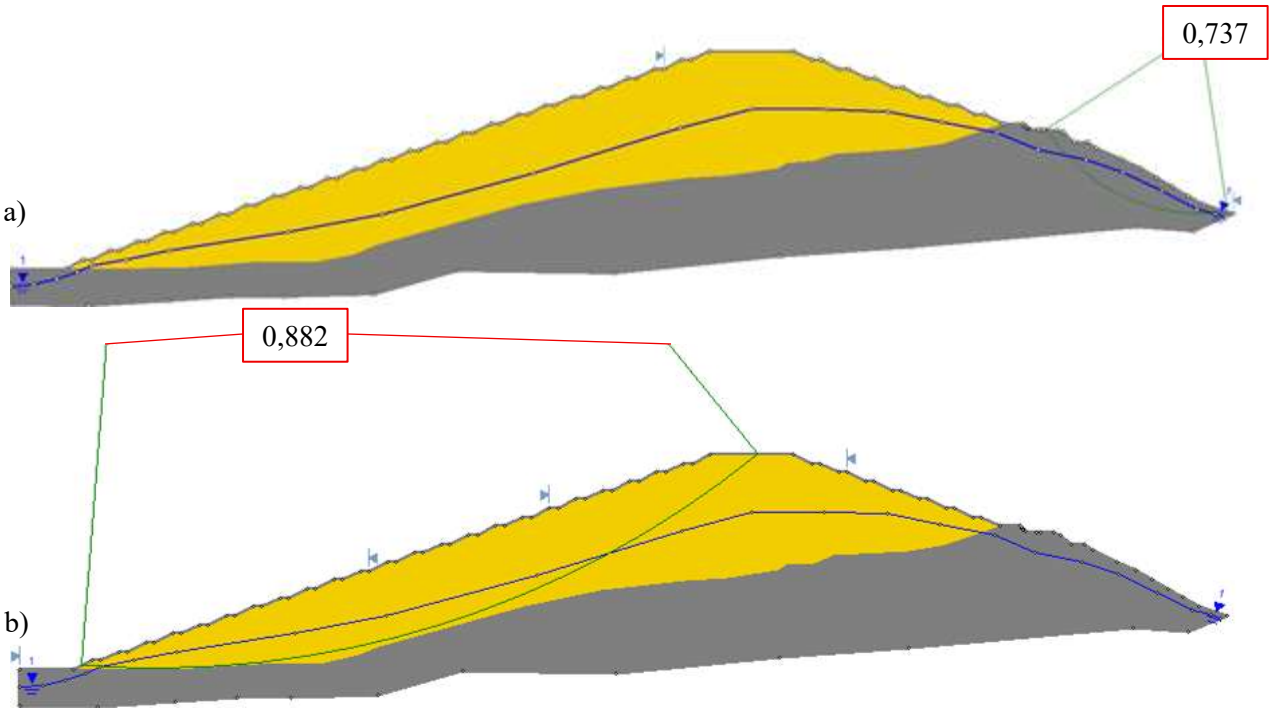


Figura 3. Resultados dos fatores de segurança após o ajuste dos fatores parciais.

Avaliando os resultados apresentados na Figura 3, observa-se que, em ambos os taludes, o fator de segurança está abaixo de 1, não satisfazendo a condição de segurança. No talude da direita, em que o fator de segurança tradicional foi de 1,517, o valor obtido com a adoção do fator parcial foi de 0,882, mostrando que a aplicação de fatores parciais reflete resultados mais conservadores. Isso demonstra que fatores parciais podem ser aplicados em projetos de pilhas, desde que reflitam as condições de carregamento e o nível de confiabilidade de projeto que se pretende alcançar.

4.1 Avaliação da probabilidade de falha da pilha

Os resultados das análises probabilísticas podem ser vistos na Figura 4. Conforme exposto no gráfico, mesmo assumindo variabilidade nos parâmetros de resistência do estéril e da fundação, a probabilidade de falha é igual a 0,00%, ou seja, não foram obtidos fatores de segurança inferiores a 1 nas simulações realizadas.

Contudo, cabe destacar que a probabilidade de falha calculada em função das simulações de Monte Carlo diverge da probabilidade de falha calculada em função do índice de confiabilidade (β), sendo este último um parâmetro mais adequado para avaliação.

Conforme mencionado anteriormente, para condições de projeto usuais, o índice de confiabilidade almejado deve ser igual ou superior a 3,80. Portanto, nenhuma das seções avaliadas atenderia a esse valor. Isso corrobora os resultados apresentados na Figura 3, aplicando os fatores parciais do trabalho de Lansivaara e Poutanen (2013), demonstrando que, como esses fatores possuem ligação direta com o índice de confiabilidade alvo, conduzem a projetos que satisfazem tanto o aspecto do fator de segurança quanto os critérios de confiabilidade e probabilidade de falha.

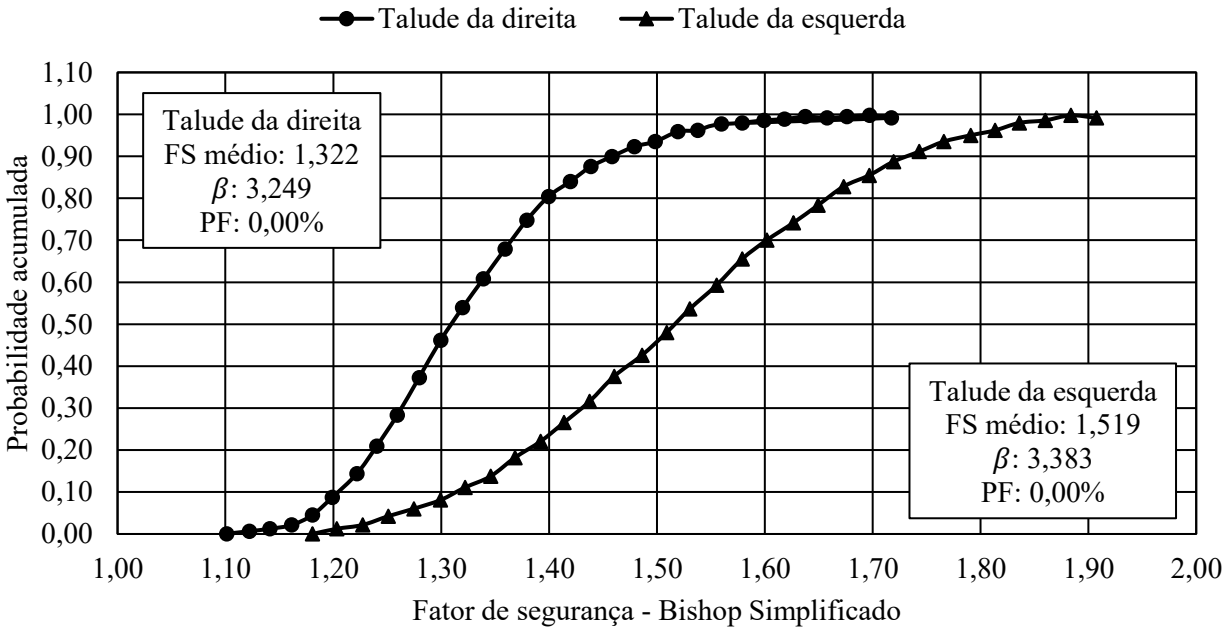


Figura 4. Gráfico de probabilidade acumulada de ocorrência dos fatores de segurança.

5 CONCLUSÕES

Fundamentado nas análises realizadas, é possível concluir que a aplicação da abordagem de projeto baseada nos fatores parciais da EN 1997-1:2004, sem a consideração dos tipos de ações que atuam na estrutura, pode conduzir a um subdimensionamento da pilha. Ao adotar a correção dos fatores parciais dos materiais sugerida por Lansivaara e Poutanen (2013), observa-se que nenhum dos taludes avaliados satisfaz a condição de segurança, sendo essa uma análise mais conservadora do que a tradicional.

Quando se avalia do ponto de vista da probabilidade de falha da estrutura, observa-se que nenhum dos taludes atingiu o índice de confiabilidade alvo de 3,80, havendo convergência com os resultados obtidos pela aplicação dos fatores parciais corrigidos pela razão entre ações variáveis e ações totais. Portanto, há uma tendência de que pilhas projetadas utilizando fatores parciais devidamente calibrados satisfaçam tanto o aspecto do fator de segurança quanto o da probabilidade de ruína.

Sugere-se que, caso sejam utilizados fatores parciais nos projetos, estes sejam calibrados com base no índice de confiabilidade, na variabilidade do material presente na pilha, além da adoção de uma incerteza geral nessa definição e da consideração das condições de carregamento, conforme apresentado por Lansivaara e Poutanen (2013).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AOKI, N. Dogma do fator de segurança. Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia. In: VI Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia - SEFE. São Paulo, 2008.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024). NBR 13029. *Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha*. Rio de Janeiro.

Cezar, B. F., Pelizzoli, L. N., Santos, M. D., Ribeiro, G. N., Borges, M. N. (2025). Caracterização física e mecânica de estéreis do quadrilátero ferrífero - MG e sua influência no fator de segurança geotécnica em pilhas. In: IX Conferência Brasileira sobre Estabilidade e Encostas – COBRAE, Garibaldi, RS. *Anais COBRAE*. p. 834-841.

Duncan, J. M. (2000) Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126 (4), p.307-316.

European Standard (2002). EN 1990: *Basis of structural design.*

European Standard (2004). EN 1997-1: *Geotechnical design - Part 1: General rules.*

Gerscovich, D. M. S., Junior, E. A. V., Campos, T. M. P. (2023) *Estabilidade de Taludes. In: Solos não saturados no contexto geotécnico*. 2nd ed. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo, Brasil. Cap. 25, p. 867-891.

Gibson, W. (1983) Probabilistic methods for slide analysis and design, *Australian Geomechanics*, 46 (3), 11 p.

Lansivaara, T., Poutanen T. (2013) Slope stability with partial safety factor method. In: *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris. p. 1823-1826.

Sandroni, S. S., Sayão, A. S. F. J. (1992) Avaliação estatística do coeficiente de segurança de taludes. In: I Conferência Brasileira sobre Estabilidade e Encostas – COBRAE, Rio de Janeiro, RJ. *Anais COBRAE*. p. 523-535.

Souza, H. A., Pereira, L., Lima, A., Resende, F., Silva, J. V. (2024) Compilação de parâmetros de resistência do Quadrilátero Ferrífero. In: XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG, Balneário Camboriú - SC. *Anais COBRAMSEG*.