

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/159

## Análise de Probabilidade de Ruptura de Barragem de Rejeito a Partir de Resultados de Ensaios CPTu e SPT: Estudo de Caso

Ana Teresa Silva de Carvalho

Estudante de graduação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, atscarv@gmail.com

Talita Caroline Miranda

D.Sc./Professora, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, talita@etg.ufmg.br

Michel Melo Oliveira

D.Sc./Professor, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, michelmelo@demin.ufmg.br

Raquel Cristina de Souza Otone

Estudante de graduação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, raquelsouzac18@gmail.com

**RESUMO:** Este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo de caso de uma barragem de rejeito, em que são realizadas análises de estabilidade determinísticas e probabilísticas a fim de se comparar os resultados fornecidos pelas diferentes abordagens. Os parâmetros de resistência e peso específico utilizados nas análises foram obtidos de ensaios CPTu e SPT. Também foram estimados a partir do CPTu os parâmetros de estado dos materiais não coesivos presentes na barragem, com o intuito de identificar quais deles podem se comportar de forma não drenada. Nas análises determinísticas foram considerados os valores médios dos parâmetros de resistência e peso específico, e nas análises probabilísticas levou-se em conta seus valores médios, desvios padrões, máximos e mínimos, além do tipo de distribuição estatística de suas amostras. Foram analisados três diferentes cenários: o primeiro deles considerou toda a estrutura com carregamento drenado, o segundo admitiu carregamento não drenado abaixo da superfície freática; e o terceiro considerou um carregamento não drenado em toda a estrutura, porém, nele foi imposta uma superfície de ruptura passando pela região onde os materiais que geralmente apresentam comportamento drenado, poderiam se comportar de forma não drenada devido ao parâmetro de estado. Os resultados obtidos para o primeiro e segundo cenários, tanto o Fator de Segurança (FS) quanto a Probabilidade de Ruptura (Pr), encontravam-se dentro da faixa de valores admissíveis.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estabilidade de Taludes, Análise Probabilística, Probabilidade de Ruptura, Barragem de Rejeito.

**ABSTRACT:** This work aims to present a case study of a tailings dam, in which deterministic and probabilistic stability analyzes are carried out in order to compare the results provided by different approaches. The resistance and specific weight parameters used in the analyzes were obtained from CPTu and SPT tests. The state parameters of the non-cohesive materials present in the dam were also estimated from the CPTu, with the aim of identifying which of them can behave in an undrained way. In the deterministic analyzes the average values of the resistance and specific weight parameters were considered, and in the probabilistic analyzes their average values, standard deviations, maximum and minimum values were taken into account, in addition to the type of statistical distribution of their samples. Three different scenarios were analyzed: the first one considered the entire structure with drained loading, the second admitted undrained loading below the water table; and the third considered an undrained load throughout the structure, however, a failure surface was imposed passing through the region where materials that generally exhibit drained behavior could behave in an undrained manner due to the state parameter. The results obtained for the first and second scenarios, both the Safety Factor (FS) and the Probability of Rupture (Pr), were within the range of admissible values.

**KEYWORDS:** Slope Stability, Probabilistic Analysis, Probability of Rupture, Tailings Dam.

## 1 INTRODUÇÃO

Uma das formas de avaliar a segurança de uma barragem é analisando a estabilidade dos taludes que a compõem e, nesse contexto, há dois métodos disponíveis para realização das análises: os determinísticos e os probabilísticos. Na abordagem determinística é calculado um fator de segurança a partir de parâmetros geotécnicos fixos dos materiais. A qualidade dos resultados obtidos através desse método é influenciada pelo fato de que esses parâmetros apresentam uma variabilidade natural, que pode ter grande dispersão. Por outro lado, no método probabilístico é considerada a variabilidade dos parâmetros dos solos envolvidos e obtida uma distribuição estatística do fator de segurança. Esse enfoque probabilístico permite a determinação de um fator de segurança médio e de valores de probabilidade de ruptura associados aos seus riscos.

Este trabalho apresenta um estudo de caso de uma barragem de rejeito, fazendo uma comparação entre análises de estabilidade pelos métodos determinístico e probabilístico para avaliação das suas condições de segurança, onde são utilizados parâmetros geotécnicos obtidos de ensaios de campo CPTu e SPT e consideradas diferentes condições de carregamento da estrutura.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Coleta e Interpretação de Ensaios de Campo

Para este estudo de caso, foram selecionados e analisados os ensaios existentes na estrutura: 11 ensaios de campo realizados próximos à seção central e crítica da barragem, sendo eles 8 ensaios CPTu e 3 sondagens SPT, com dados diversos obtidos por correlações ao longo dos furos de CPTu (em cm) e SPT (a cada metro), tendo assim um número considerável de infações para aplicação de análise estatística. Nos ensaios de piezocone foram feitas as leituras dos dados de resistência de ponta ( $q_c$ ), atrito lateral ( $f_s$ ) e poropressão ( $u_2$ ), e a partir desses dados foram corrigidas as leituras de  $q_c$  para obtenção da resistência real mobilizada no ensaio ( $q_t$ ). Para determinação da estratigrafia e classificação dos solos (SBT e SBTn), foram utilizados os gráficos de classificação do tipo de comportamento do solo SBT propostos por Robertson e Cabal (2015) e Robertson (2016).

Posteriormente à classificação dos solos, foi estimada a resistência ao cisalhamento não drenada ( $S_u$ ) para os materiais coesivos do maciço e do rejeito, utilizando as equações propostas por Robertson (2012). Para materiais não coesivos do maciço, rejeito e drenagem interna, estimou-se o ângulo de atrito interno ( $\phi'$ ) através da aplicação da correlação sugerida por Kulhawy e Mayne (1990 citados por Robertson & Cabal, 2015). Ademais, também foi estimado o peso específico dos materiais presentes na seção crítica da barragem, utilizando a relação proposta por Robertson (2010 citado por Robertson, 2012). Em seguida, os parâmetros de resistência e peso específico foram discriminados para cada camada componente da barragem: dique principal, 1º alteamento a montante, 2º alteamento a montante, 3º alteamento a montante, 4º alteamento a montante, alteamento a jusante, rejeito (reservatório), rejeito (entre o maciço e a fundação) e filtro e tapete drenante. Para fundação e drenos de pé, foram utilizados os dados obtidos das sondagens SPT. Então, foram calculados os valores médios, máximos, mínimos e desvios padrões dos parâmetros de resistência ( $\phi'$  e/ou  $S_u$ ) e peso específico ( $\gamma$ ) para cada uma das camadas.

Por último, a partir dos resultados do CPTu, foi estimado o parâmetro de estado ( $\psi$ ) para os materiais não coesivos da seção crítica, utilizando a correlação sugerida por Robertson (2010 citado por Robertson, 2012) e, através dele, foi possível conhecer a tendência contrativa ou dilatante desses materiais e identificar quais deles podem se comportar de forma não drenada, de acordo com Nierwinski (2013). Dessa forma, foram inseridos na seção crítica os pontos ensaiados que apresentaram materiais com tendência contrativa e traçada uma superfície circular passando por eles, com o objetivo de calcular seu Fator de Segurança em uma análise de estabilidade com carregamento não drenado.

Através dos ensaios SPT, foram obtidos os índices de resistência à penetração (NSPT), a estratigrafia do perfil e a classificação dos materiais presentes nas camadas ensaiadas quanto à consistência, no caso de argilas e siltes argilosos, ou à compactação, para areias e siltes arenosos, através de análise-tátil-visual e conforme a NBR 6484 (ABNT, 2020). Por meio da aplicação de correlações com o índice de resistência à penetração (NSPT), foram estimados os valores de resistência não drenada ( $S_u$ ) para os materiais coesivos da fundação, utilizando a equação proposta por Teixeira e Godoy (1996 citados por Cintra & Aoki, 2010), e ângulo

de atrito interno ( $\phi'$ ) para os solos não coesivos da fundação e drenos de pé, considerando a relação sugerida por Teixeira (1996 citado por Cintra & Aoki, 2010).

Posteriormente, os parâmetros foram discriminados para as camadas referentes à fundação e drenos de pé e, finalmente, calculou-se os valores médios, máximos, mínimos e desvios padrões dos parâmetros de resistência ( $\phi'$  e  $S_u$ ) e peso específico ( $\gamma$ ) para os materiais da fundação. Para os drenos de pé, foram calculados somente os valores médios de  $\phi'$  e  $\gamma$ , devido a pouca quantidade de dados obtidos para essa camada.

## 2.2 Análise Estatística dos Parâmetros

Utilizando o software R em sua versão online, foram efetuados testes para a definição do tipo de distribuição estatística das amostras dos parâmetros de resistência ( $\phi'$  e  $S_u$ ) e peso específico ( $\gamma$ ) a serem consideradas nas análises de estabilidade probabilísticas para os materiais do corpo da barragem, rejeito, fundação, filtro e tapete drenante. Em relação aos drenos de pé, não houve amostragem suficiente de dados para uma análise estatística. As amostras foram verificadas para distribuição normal, distribuição lognormal e distribuição gamma, e aquelas que não se encaixaram em nenhum dos tipos verificados foram consideradas uniformemente distribuídas.

## 2.3 Modelo de Cálculo e Premissas Adotadas

O modelo geológico-geotécnico adotado nas análises de estabilidade foi definido com base no prévio conhecimento geométrico da seção crítica da barragem e posterior determinação da estratigrafia e definição dos pesos específicos e parâmetros dos materiais que a compõem.

A superfície freática do modelo foi determinada a partir da obtenção de valores de pressão hidrostática diferentes de zero ( $u_0 \neq 0$ ) nos ensaios de piezocone e considerando a indicação de nível d'água nos boletins das sondagens realizadas. Os valores de poropressão adotados nas análises foram calculados em função dessa superfície. Uma vez que a estrutura já se encontra desativada há anos, neste trabalho foi considerada percolação estável no maciço, com fluxo em regime permanente instalado e processo de adensamento do solo em fase avançada.

As análises foram feitas com o auxílio do software *Slide 2D* da empresa *Rocscience*, e realizadas por dois métodos rigorosos de equilíbrio-limite: método de Morgenstern-Price e método de Spencer. Em todas as análises, buscou-se por superfícies circulares de ruptura no talude de jusante, considerado crítico pelo fato de o talude de montante estar submerso, com as forças de percolação da água atuando num sentido e direção que tendem a estabilizá-lo.

### 2.3.1 Cenários Analisados

Nas análises de estabilidade foram considerados 3 diferentes cenários, o primeiro deles (Cenário 1) considera que toda a estrutura apresenta carregamento drenado, inclusive a fundação. Nele, são levados em conta o comportamento dos materiais não coesivos de cada camada componente da seção crítica, adotando como parâmetro de resistência para todos os materiais somente o ângulo de atrito interno ( $\phi'$ ) e peso específico estimado para cada camada. O Cenário 2 admitiria carregamento drenado nas camadas acima do nível d'água e carregamento não drenado nas camadas abaixo do nível d'água, exceto na drenagem interna e nos drenos de pé. No entanto, ao realizar as análises de estabilidade, foram obtidos valores muito baixos de Fator de Segurança. Dessa forma, optou-se por analisar o Cenário 2 admitindo carregamento drenado também na fundação. Nos locais onde o carregamento foi considerado não drenado, levou-se em conta o comportamento dos materiais coesivos das camadas, adotando o parâmetro de resistência ao cisalhamento não drenado ( $S_u$ ). Naquelas onde foi considerado drenado, utilizou-se o ângulo de atrito interno ( $\phi'$ ). Além disso, foram considerados os pesos específicos de cada camada.

No terceiro cenário analisado (Cenário 3), é considerada a tendência contrativa e susceptibilidade à liquefação dos materiais da seção crítica. Dessa forma, é imposta uma análise na superfície circular que passa pela região onde os materiais que geralmente apresentam comportamento drenado podem se comportar de forma não drenada. Buscando o pior cenário possível nessa análise, foi considerado um carregamento não drenado em toda a estrutura, exceto na drenagem interna e nos drenos de pé. Dessa forma, utilizou-se o ângulo

de atrito interno ( $\phi'$ ) como parâmetro de resistência para as camadas drenantes e o parâmetro de resistência não drenada ( $S_u$ ) nas demais camadas. Além disso, foi considerado o peso específico dos materiais.

### 2.3.2 Análises de Estabilidade Determinísticas

As análises de estabilidade determinísticas consideraram os valores médios dos parâmetros de resistência e peso específico estimados a partir dos ensaios de campo para as camadas da seção crítica, e para cada cenário analisado foi obtido um único Fator de Segurança associado a uma superfície de ruptura para cada método de análise (Morgenstern-Price e Spencer).

Os Fatores de Segurança resultantes das análises foram comparados com o valor admissível para condição de rede de fluxo em condição permanente preconizado pela NBR 13028 (ABNT, 2017), que estabelece um Fator de Segurança mínimo igual a 1,50 para barragens de mineração, considerando crítico o talude de jusante.

### 2.3.3 Análises de Estabilidade Probabilísticas

As análises de estabilidade probabilísticas levaram em conta a variabilidade dos parâmetros de resistência e peso específico dentro de um intervalo, considerando a distribuição estatística de cada um deles e utilizando seus valores médios, desvios padrões, máximos e mínimos. No presente trabalho, foram variados os parâmetros de todos os materiais que compõem o maciço, rejeito, drenagem interna e fundação da barragem, com exceção dos drenos de pé, pois não foram obtidos dados suficientes para realização de uma análise estatística deles. Ademais, a superfície freática do modelo também foi mantida constante.

Nas análises com abordagem probabilística, foi utilizado o Método Monte Carlo com a realização de 30.000 iterações para cada caso de carregamento. Nos Cenários 1 e 2, foram adotados os dois tipos de análise disponíveis no *Slide*, *Global Minimum* e *Overall Slope*, ambos calculados pelos métodos de Morgenstern-Price e Spencer. Para o Cenário 3, somente a opção *Global Minimum* foi executada, pois nele foi imposta uma superfície de ruptura específica, não sendo interessante, portanto, a utilização do tipo de análise *Overall Slope*. Também os métodos de cálculo de Morgenstern-Price e Spencer foram considerados nesse cenário. Nas análises probabilísticas, o *Slide* fornece os valores de Pr com um número limitado de casas decimais. Dessa forma, a Probabilidade de Ruptura de cada análise realizada foi calculada utilizando o *Excel*, considerando uma distribuição normal dos Fatores de Segurança obtidos para cada iteração realizada.

Os valores de Probabilidade de Ruptura (Pr) obtidos através das análises probabilísticas foram comparados com valores de Pr admissíveis para taludes de barragens sugeridos pela literatura, pois não existe nenhuma norma brasileira que preconize tais valores. Whitman (1984 citado por Apaza & Barros, 2014) recomenda uma Pr da ordem de  $10^{-4}$ , Dell'avanzi e Sayão (1998 citado por Apaza & Barros, 2014) indicam valores admissíveis entre  $10^{-3}$  e  $10^{-5}$ , e Wolff (1996 citado por Apaza & Barros, 2014) sugere uma Pr de  $3 \times 10^{-5}$  como aceitável.

## 3 ÁREA DE ESTUDO

A barragem de disposição de rejeitos estudada neste trabalho teve seu dique de partida construído com material argiloso compactado e crista na elevação 963,00 m, em 2007. A estrutura teve seu primeiro alteamento realizado pelo método de jusante, em 2008, com a utilização de solo residual de filito no corpo e material argiloso na face de montante, alcançando a elevação de 983,00 m. Posteriormente, foram realizados quatro alteamentos a montante em aterro compactado utilizando-se também solo residual de filito. Por último, a estrutura foi alteada pelo método de jusante e chegou à elevação 1011,00 m.

Em 2014, as atividades minerárias realizadas pela empresa proprietária da barragem foram paralisadas e desde então a estrutura encontra-se desativada, sendo apenas realizadas auditorias e monitoramento periódico da sua estabilidade.

Com o intuito de subsidiar a conclusão de um Relatório de Condição de Estabilidade da estrutura, foram realizadas em 2019, investigações geológico-geotécnicas acerca do rejeito depositado e dos materiais presentes no corpo da barragem e sua fundação, que incluíram os ensaios CPTu e SPT considerados neste trabalho.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios, mínimos, máximos e desvios padrões dos parâmetros obtidos por meio dos ensaios CPTu e SPT são exibidos, por camadas, na Tabela 1.

Tabela 1. Valores médios, desvios padrões, máximos e mínimos dos parâmetros de resistência e peso específico, por camada.

Camada	Valor médio	Desvio padrão	Valor máximo	Valor mínimo
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )			
Dique principal	20,40	0,83	21,58	17,77
1º alteamento a montante	19,70	0,93	21,05	17,85
2º alteamento a montante	20,27	0,92	21,58	18,09
3º alteamento a montante	20,03	0,63	21,44	18,65
4º alteamento a montante	20,19	0,79	21,58	17,03
Alteamento a jusante	19,46	1,01	21,57	15,58
Rejeito (reservatório)	17,85	1,30	21,58	13,73
Rejeito (entre maciço e fundação)	18,87	0,44	19,88	18,09
Filtro e tapete drenante	20,72	0,68	21,41	19,34
Fundação	18,84	1,34	21,00	17,00
Drenos de pé	20,00	-	-	-
	$S_u$ (kPa)			
Dique principal	469,85	183,91	1161,00	142,57
1º alteamento a montante	311,35	128,18	776,54	103,44
2º alteamento a montante	414,68	195,97	713,02	156,45
3º alteamento a montante	380,99	152,28	669,11	70,69
4º alteamento a montante	254,45	106,18	587,80	117,79
Alteamento a jusante	271,81	118,47	797,27	27,30
Rejeito (reservatório)	154,85	108,81	919,32	3,58
Rejeito (entre maciço e fundação)	288,87	109,81	500,27	143,08
Fundação	112,00	56,30	210,00	70,00
	$\phi$ (°)			
Dique principal	39,84	1,89	43,94	33,33
1º alteamento a montante	37,13	1,71	40,67	34,55
2º alteamento a montante	41,34	2,47	45,30	36,36
3º alteamento a montante	40,67	2,30	44,98	37,58
4º alteamento a montante	41,49	1,99	46,15	38,26
Alteamento a jusante	41,82	3,14	48,09	33,04
Rejeito (reservatório)	35,83	2,39	44,07	32,44
Rejeito (entre maciço e fundação)	34,60	1,12	38,23	32,84
Filtro e tapete drenante	41,10	1,63	43,84	38,84
Fundação	33,93	7,85	46,62	23,94
Drenos de pé	46,62	-	-	-

As análises estatística realizadas forneceram como resultados para as amostras de todos os parâmetros referentes as camadas dos alteamentos a montante, rejeito (entre maciço e fundação), fundação, e filtro e tapete drenante, uma distribuição do tipo normal. Para as camadas referentes ao dique principal e ao alteamento a jusante, foi verificada distribuição normal dos parâmetros  $S_u$  e  $\phi'$ , e considerada distribuição uniforme de  $\gamma$ . Em relação a camada de rejeito (reservatório), todos os parâmetros foram considerados uniformemente distribuídos. Quanto aos drenos de pé, não houve amostragem suficiente de dados para obtenção de uma distribuição estatística. Por essa razão, seus parâmetros foram mantidos constantes em todas as análises de estabilidade.

Já o modelo adotado para a seção crítica da barragem é apresentado na Figura 2. Nele, é possível observar que a superfície freática não segue pela drenagem interna e ultrapassa o filtro vertical. A partir dessa

observação, admite-se que a drenagem interna está colmatada, uma vez que se trata de uma estrutura antiga que já passou por diversos alteamentos.

Os parâmetros de resistência e peso específico adotados variaram de acordo com o cenário analisado e, nas análises determinísticas foram utilizados os valores médios dos parâmetros, enquanto nas análises com abordagem probabilística, utilizou-se os valores médios, desvios padrões, máximos e mínimos dos parâmetros que apresentaram distribuição estatística normal, e valores médios, máximos e mínimos para os parâmetros que apresentaram distribuição uniforme.

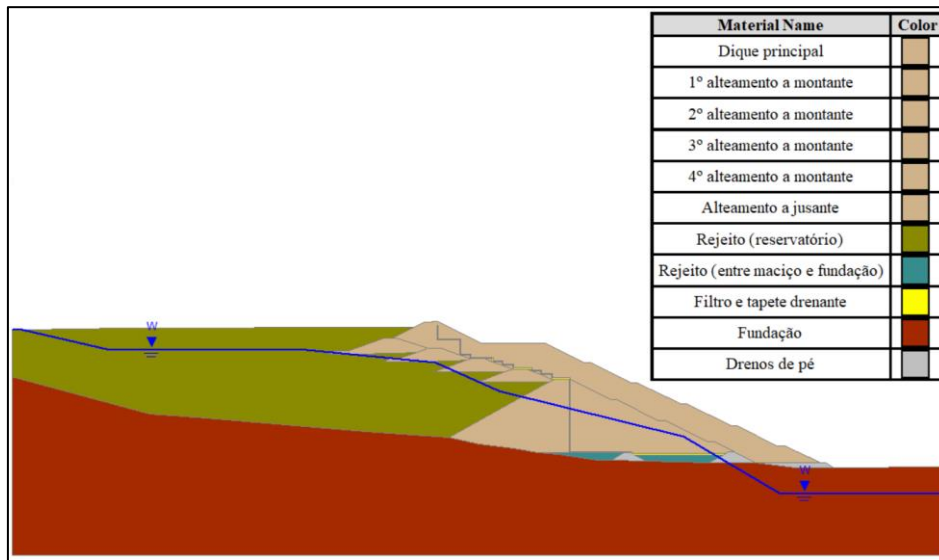


Figura 2. Modelo adotado nas análises de estabilidade

#### 4.4 Análises de Estabilidade Determinísticas

Nas análises determinísticas, para cada cenário analisado foi obtido um único Fator de Segurança associado a uma superfície de ruptura para cada método de análise considerado (Morgenstern-Price e Spencer). Os Fatores de Segurança calculados nas análises determinísticas são exibidos na Tabela 2.

Tabela 2. FS obtidos nas análises de estabilidade determinísticas para cada cenário.

Cenário	Método	FS obtido
1	Spencer	1,871
	Morgenstern-Price	1,873
2 <sup>1</sup> (com carregamento não drenado na fundação)	Spencer	0,576
	Morgenstern-Price	0,573
2 (com carregamento drenado na fundação)	Spencer	1,893
	Morgenstern-Price	1,906
3	Spencer	3,963
	Morgenstern-Price	3,963

<sup>1</sup> Cenário improvável devido as limitações geométricas do modelo.

No primeiro cenário analisado, os valores de FS obtidos foram superiores ao mínimo admissível de 1,50 preconizado pela NRB 13028 (ABNT, 2017), com a superfície de ruptura ocorrendo no corpo da barragem. Para o segundo cenário, os Fatores de Segurança calculados considerando carregamento não drenado na fundação foram muito inferiores a 1. Esse resultado indica que a estrutura já estaria rompida quando a análise foi executada, o que não representa a realidade, uma vez que a barragem se encontra estável atualmente. Dessa forma, admitiu-se carregamento drenado da fundação e a análise de estabilidade foi calculada novamente.

Os resultados de FS fornecidos pelas novas análises realizadas no Cenário 2 foram superiores aos valores normatizados, e aos valores de FS obtidos para o Cenário 1, que considerou comportamento drenado em todos os materiais da seção crítica e, conseqüentemente, realizou uma análise indicando a superfície de ruptura no maciço da barragem. No entanto, verifica-se que a superfície de ruptura obtida para o Cenário 2 considerando as fundações como material drenante passa pelo rejeito e alteamentos da barragem, diferentemente do Cenário 1. No terceiro cenário, os valores de Fator de Segurança obtidos foram muito superiores ao mínimo admissível, mesmo considerando o pior cenário de carregamento não drenado ao longo da superfície de ruptura imposta, devido ao parâmetro de estado.

#### 4.5 Análises de Estabilidade Determinísticas

Cada análise de estabilidade probabilística forneceu como resultados o FS médio probabilístico, o desvio padrão de FS, o histograma de FS e a Probabilidades de Ruptura ( $P_r$ ). Ademais, nas análises *Overall Slope*, obteve-se também resultados de superfícies potenciais de ruptura. A Probabilidade de Ruptura calculada para a análises probabilísticas, e os Fatores de Segurança médios probabilísticos e desvios padrões obtidos pelo *Slide* são exibidos na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados obtidos nas análises de estabilidade probabilísticas

Cenário	Tipo de Análise	Método	FS médio probabilístico	Desvio padrão FS	Pr calculada
1	<i>Global Minimum</i>	Spencer	1,930	0,2655	$2,3 \times 10^{-4}$
		Morgenstern-Price	1,930	0,2759	$3,7 \times 10^{-4}$
	<i>Overall Slope</i>	Spencer	1,793	0,1933	$2,0 \times 10^{-5}$
		Morgenstern-Price	1,793	0,1945	$2,3 \times 10^{-5}$
2	<i>Global Minimum</i>	Spencer	2,334	0,4345	$1,1 \times 10^{-3}$
		Morgenstern-Price	2,338	0,4305	$9,4 \times 10^{-4}$
	<i>Overall Slope</i>	Spencer	1,796	0,2249	$2,0 \times 10^{-4}$
		Morgenstern-Price	1,796	0,2276	$2,3 \times 10^{-4}$
3	<i>Global Minimum</i>	Spencer	6,683	2,4800	$1,1 \times 10^{-2}$
		Morgenstern-Price	6,690	2,4790	$1,1 \times 10^{-2}$

Observa-se que para todos os cenários, os Fatores de Segurança médios calculados pelos métodos de Morgenstern-Price e Spencer foram iguais ou muito próximos. Em relação ao tipo de análise, a opção *Overall Slope* apresentou valores de FS médios inferiores àqueles fornecidos pela *Global Minimum* (Cenários 1 e 2).

No Cenário 3, os valores de FS médios probabilísticos obtidos foram bastante elevados e muito superiores àqueles fornecidos pelas análises determinísticas. Quanto a Probabilidade de Ruptura, verifica-se que o tipo de análise *Overall Slope* forneceu valores aproximadamente 10 vezes menores de Probabilidade de Ruptura do que o *Global Minimum* (Cenários 1 e 2).

No primeiro e segundo cenários analisados, as Probabilidades de Rupturas calculadas têm ordem de grandezas aceitáveis de acordo com a literatura, que sugere como admissíveis valores entre  $10^{-3}$  e  $10^{-5}$ . O terceiro cenário analisado apresentou a maior Probabilidade de Ruptura, fornecendo valores de Pr superiores aos máximos admissíveis, mesmo com os altos Fatores de Segurança calculados. É importante observar que, embora os FS obtidos para o Cenário 3 tenham sido altos, os desvios padrões também foram elevados.

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho desenvolveu um estudo de caso de uma barragem de contenção de rejeitos, em que foram analisados os ensaios de campo realizados na seção crítica da estrutura para classificação dos materiais que a compõem e obtenção de parâmetros geotécnicos, que posteriormente foram utilizados para avaliar a estabilidade de seus taludes através das abordagens determinística e probabilística.

Em todas as análises, os valores de FS calculados pelos métodos de Morgenstern-Price e Spencer foram iguais ou muito próximos entre si, e atenderam ao mínimo de 1,50 preconizado pela NRB 13028.

Comparando todos os FS calculados através das abordagens determinística e probabilística, os maiores valores foram obtidos pelas análises do tipo *Global Minimum*, enquanto a opção *Overall Slope* forneceu os menores resultados. Além disso, observou-se que os FS calculados pelas diferentes abordagens não se assemelharam em 2 dos 3 cenários analisados.

Quanto a probabilidade de ruptura, foram calculadas nas análises do tipo *Overall Slope* valores aproximadamente 10 vezes menores do que nas análises do tipo *Global Minimum*. Ainda assim, no primeiro e segundo cenários analisados, as Pr obtidas têm ordens de grandezas aceitáveis de acordo com a literatura, que sugere como admissíveis valores entre  $10^{-3}$  e  $10^{-5}$ .

No terceiro cenário, a Pr calculada foi superior a faixa de valores máximos admissíveis, mesmo tendo apresentado altos valores de FS, especialmente nas análises probabilísticas. Contudo, os desvios padrões de FS também foram elevados, o que indica grande variabilidade dos parâmetros considerados.

Para obtenção de resultados mais convergentes entre as duas abordagens, é interessante a incorporação de dados de investigações geológico-geotécnicas mais abrangentes, incluindo ensaios de laboratório, pois isso permitiria comparar os parâmetros estimados através dos ensaios de CPTu com os dados fornecidos por outros ensaios, o que reduziria a incerteza do modelo de cálculo adotado.

Além disso, pode ser interessante a exclusão de *outliers* das amostras de valores obtidas, especialmente dos ensaios CPTu, que fornecem elevados volumes de informações que podem interferir nos resultados, aumentando o desvio padrão do FS e diminuindo a confiabilidade da análise. Outro fator relevante que pode influenciar os resultados das análises probabilísticas é a consideração inadequada da distribuição estatística dos parâmetros amostrados.

É importante ressaltar que, devido aos inúmeros parâmetros geotécnicos estimados pelos ensaios de CPTu, neste trabalho optou-se por utilizar o parâmetro de estado para indicar quais pontos na seção analisada poderiam compor uma superfície de ruptura onde o material não coesivo se comportaria de forma não drenada. Esta situação foi observada no material de rejeito com predominância de material siltoso. Nesta situação, verificou-se um FS alto, acima do que preconiza a norma, mas uma Pr acima do que é estabelecido pela literatura. Recomenda-se para trabalhos futuros incluir análises mais robustas considerando a liquefação deste material.

Por fim, as análises realizadas neste estudo mostraram que altos valores de FS não equivalem necessariamente a baixas probabilidades de ruptura e, por essa razão, a aplicação conjunta das abordagens determinística e probabilística é um importante recurso para compreender melhor o comportamento das estruturas e realizar um projeto de engenharia mais econômico e seguro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APAZA, Marco Aurelio Flores; BARROS, José Maria de Camargo. (2014) *Análise probabilística de estabilidade de Taludes pelo Método de Monte Carlo*. In: XVII COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Goiânia.
- CINTRA, José Carlos A.; AOKI, Nelson. (2010) *Fundações por estacas: projeto geotécnico*. São Paulo: Oficina de Textos.
- NIERWINSKI, Helena Paula. (2013) *Potencial de liquefação de resíduos de mineração estimado através de ensaios de campo. Dissertação (Mestrado)* - Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- ROBERTSON, Peter K. (2012) *Interpretation of in-situ tests - some insights*. Mitchell Lecture - ISC, v. 4, p. 1-22.
- ROBERTSON, Peter K. (2016) *Cone penetration test (CPT) - based soil behaviour type (SBT) classification system: an update*. Canadian Geotechnical Journal, v. 53, n. 12, p. 1910-1927, 2016.
- ROBERTSON, Peter K.; CABAL, K.L. (2015) *Guide to cone penetration testing for geotechnical engineering*. 6. ed. Signal Hill: Gregg Drilling & Testing, Inc.