

Análise de estabilidade probabilística de uma barragem de terra, considerando a variabilidade dos parâmetros geotécnicos e riscos associados à ruptura: Aplicação na barragem da margem esquerda da PCH João Borges.

Probabilistic stability analysis of an earth dam, considering the variability of the geotechnical parameters and risks associated with the rupture: Application in the dam on the left bank of the PCH João Borges.

Marcelo Manoel Fernandes

*Pós Graduando , Instituto IDD , Segurança de Barragens , São Paulo
Rua Capitão Augusto Vidal, 3430 – Edifício Gustavo Kirchner, Palhoça, Santa Catarina, SC Brasil –
CEP 88131-050*

Resumo

As variabilidades dos parâmetros geotécnicos dos solos representam muita importância na análise de estabilidade de uma barragem de terra, visto que os parâmetros naturais destes materiais sofrem variações locais (jazida para jazida, mesmo que próximas). Neste contexto, as análises probabilísticas para definição de ruptura de barragens tem sido cada vez mais utilizadas para quantificar as incertezas relativas às variáveis envolvidas nas análises, a partir de conceitos estatísticos, fornecendo como solução um fator de segurança (FS) médio e a probabilidade de ruptura (Pr) do talude.

Este artigo apresenta um estudo da estabilidade da barragem de terra na margem esquerda da PCH João Borges, levando em consideração a variação dos parâmetros geotécnicos do solo, através do método probabilístico de Monte Carlo utilizando-se da distribuição normal. A ferramenta utilizada para realização das análises foi o software Slope/W da GeoStudio.

Após os resultados das análises de estabilidade, foi comparado os resultados da probabilidade de ruptura com valores bibliográficos de referência quanto aos níveis de desempenho esperados, em função da probabilidade de ruptura e do índice de confiabilidade relacionados a ruptura de barragens. No resultado das análises probabilísticas de Monte Carlo no software Slope/W, a análise com FS mínimo < 1 ocorreu para a condição de carregamento Final de Construção. O resultado que ultrapassou o limite de probabilidade de ruptura de barragens ocorreu também para a condição de carregamento Final de Construção.

Palavra-Chave: Parâmetros geotécnicos, análise de estabilidade, barragem de terra, análises probabilísticas, probabilidade de ruptura.

Abstract

The variability of the geotechnical parameters of the soils is very important in the analysis of the stability of a dam of earth, since the natural parameters of these materials suffer local variations (deposit for deposit, even if nearby). In this context, the probabilistic analyzes to define dam rupture have been increasingly used to quantify the uncertainties related to the variables involved in the analyzes, based on statistical concepts, providing as solution a mean safety factor (FS) and the probability of (Pr) of the slope. This article presents a study of the stability of the earth dam on the left bank of the João Borges SHP, taking into account the variation of the soil geotechnical parameters, using the Monte Carlo probabilistic method using the normal distribution. GeoStudio's Slope / W software was used for the analysis. After the results of the stability analyzes, the results of the probability of rupture with reference bibliographical values were compared with the expected performance levels, depending on the probability of rupture and the reliability index related to

dam rupture. In the result of Monte Carlo probabilistic analyzes in the Slope / W software, the analysis with minimum FS <1 occurred for the condition of Final Loading of Construction. The result that exceeded the limit of probability of dam rupture also occurred for the condition of Final Loading of Construction.

Keywords: Geotechnical parameters, stability analysis, earth dam, probabilistic analyzes, probability of rupture.

1 Introdução

As barragens constituem obras de infraestrutura essenciais para o desenvolvimento humano, sendo construções muito representativas em cenários de perspectivas econômicas, sociais e ambientais. Visto a complexidade deste tipo de obra, a segurança de barragens constitui especial preocupação devido ao potencial risco de ruptura ou algum outro grave acidente.

É fundamental assegurar a estabilidade de uma barragem, haja vista que a ruptura de taludes apresenta-se como uma das principais causas de rompimento de barragens de terra. Para tanto, faz-se necessário estudar fatores referentes as características do local de implantação e os materiais envolvidos na construção, tendo em mente as incertezas envolvidas nos parâmetros considerados para o dimensionamento.

Comumente utilizados para análise de estabilidade global de barragens de terra, os métodos determinísticos fundamentam-se em empregar parâmetros fixos dos materiais para a obtenção de um fator de segurança. Contudo, ocorre uma falta de confiabilidade estabelecida à precisão deste tipo de análise devido a uma oscilação natural que sofrem os parâmetros utilizados no dimensionamento.

Os métodos probabilísticos apresentam-se como maneira alternativa para análise de estabilidade de taludes. A partir deles pode-se quantificar as variáveis envolvidas na análise, associando-as à funções de distribuição de probabilidade, obtendo assim como retorno um fator de segurança médio e a probabilidade de ruptura do talude em estudo. Ainda que seja uma técnica de análise mais rigorosa e precisa, os métodos probabilísticos não são muito difundidos no meio prático pelos Engenheiros.

O presente trabalho apresenta a aplicação do método probabilístico da simulação Monte Carlo para análise de estabilidade de taludes da barragem da margem esquerda da PCH João Borges. Avalia-se a possibilidade, em termos de resistência e estabilidade, da utilização de materiais da jazida disponível na etapa de projeto para o corpo da Barragem.

2 Método Probabilístico para Análise de Estabilidade de Taludes

A análise probabilística permite a quantificação das incertezas inerentes a um projeto geotécnico de taludes, geradas pela variabilidade natural existente dos parâmetros dos solos. Para isso, utiliza de procedimentos estatísticos e probabilísticos a fim de tornar possível a avaliação da probabilidade de ruptura ou desempenho insatisfatório do talude, permitindo maior eficiência e racionalidade na análise realizada pelo Engenheiro.

Os métodos referentes a este tipo de análise possuem como base os princípios da análise determinística, como modos de ruptura e condições de equilíbrio limite da massa de solo. Entretanto, a partir da possibilidade de se quantificar as incertezas envolvidas, os resultados demonstram, além do fator de segurança, o desempenho mais provável e a potencial variabilidade do talude.

2.1 Fator de Segurança, Índice de Confiabilidade e Probabilidade de Ruptura

O fator de segurança (F_s) pode ser definido como a razão entre as forças resistentes (tf) e as forças instabilizadoras (τ_{mob}), isto é:

$$f_s = \frac{tf}{\tau_{mob}} \quad (1)$$

O índice de confiabilidade (β) de um talude pode ser entendido como a probabilidade que o mesmo se mantenha estável sob determinada condição de projeto, sendo expressa pela equação:

$$\beta = \frac{(\mu_{fs} - 1,0)}{\sigma_{fs}} \quad (2)$$

Onde μ_{fs} e σ_{fs} são, respectivamente, a média e o desvio padrão do fator de segurança. A probabilidade de ruptura (Pr), dentro da análise de estabilidade de taludes é a probabilidade do fator de segurança ser inferior a 1,0, indicando seu rompimento. No caso de desempenho insatisfatório, a probabilidade de ruptura é definida como a possibilidade do valor da função de desempenho exceder o estado limite considerado. Desta forma, a probabilidade de ruptura (Pr) estará relacionada ao índice de confiabilidade (β) para qualquer hipótese consistente admitida na distribuição de probabilidade do fator de segurança (f_s).

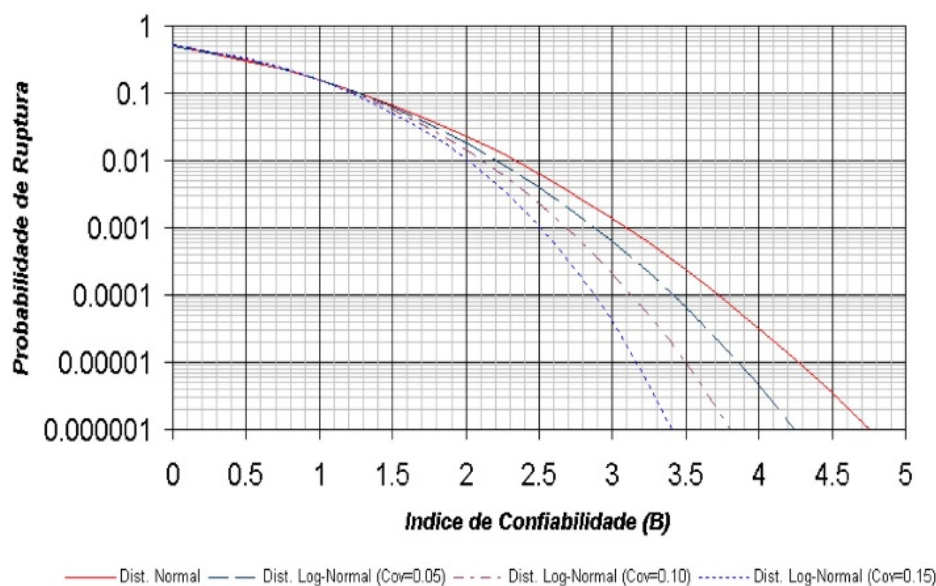


Figura 1 - Relação entre Probabilidade de Ruptura e Índice de Confiabilidade (Sandroni e Sayão, 1992).

A probabilidade de ruptura (Pr), quando seguindo a distribuição de probabilidade normal, segue a seguinte equação:

$$Pr = 1 - \Phi(\beta) = \phi(-\beta) \quad (3)$$

De acordo com a Figura 1 observa-se que a probabilidade de ruptura (Pr) para valores de índice de confiabilidade (β) até 1,5 são praticamente iguais para todas as funções de distribuição. Para valores de β superiores a 1,5 a probabilidade de ruptura é ligeiramente maior quando se admite uma distribuição normal. Deste modo, assumir as distribuições normais de probabilidade, na escassez de informações, se torna um procedimento a favor da segurança.

2.2 Método da Simulação Monte Carlo

A simulação Monte Carlo é um método de análise probabilística desenvolvido por Hammersley e Handscomb em 1964, sendo o mais utilizado e difundido entre os profissionais que utilizam a abordagem probabilística para análise de estabilidade de taludes.

Por adotar uma metodologia de cálculo flexível, a simulação Monte Carlo possibilita sua aplicação em uma ampla variedade de problemas em taludes, incluindo condições distintas de carregamento, estratigrafia complexa, grande número de variáveis de entrada e diferentes funções de densidade de probabilidade dos parâmetros de entrada.

Para a aplicação do método inicialmente é necessário selecionar o modelo determinístico de base para a função de desempenho, como o método de Bishop, por exemplo. Após tomar a decisão relativa à quais parâmetros serão modelados probabilisticamente e as funções de distribuição das variáveis de entrada, utilizando um gerador de números aleatórios e respeitando a curva de distribuição, estima-se os parâmetros de entrada do modelo determinístico adotado. Com isso, utilizam-se estes valores para resolver a função de desempenho, calculando assim o fator de segurança (F_s), considerando a superfície crítica obtida a partir da análise determinística previamente realizada.

Com a repetição do processo inúmeras vezes, é possível construir a distribuição de frequências da variável de desempenho (f_s), obtendo assim suas principais características de variação, o fator de segurança médio (f_{smed}) e a probabilidade de ruptura (Pr) do talude. Foi utilizada a equação proposta pela Empresa GEO-SLOPE International Ltda, conforme indicado em seu tutorial para a simulação pelo Método de Monte Carlo.

$$N_{mc} = \left[\frac{(d^2)}{(4(1 - \varepsilon)^2)} \right]^m \quad (4)$$

Onde,

N_{mc} – número de interações de Monte Carlo;

ε – nível de confiança desejado (0 a 100%);

d – desvio padrão normal correspondente ao nível de confiança;

m – Número de variáveis considerada na simulação de Monte Carlo.

Para estas simulações foi utilizado o valor de 4500 interações, conforme equação (4). Quanto maior o número de iterações realizadas no processo de cálculo mais precisa será a solução exposta. El-Ramly (2001) destaca que a solução, na maioria dos casos, deixa de ser sensível ao número de iterações da ordem de poucos milhares.

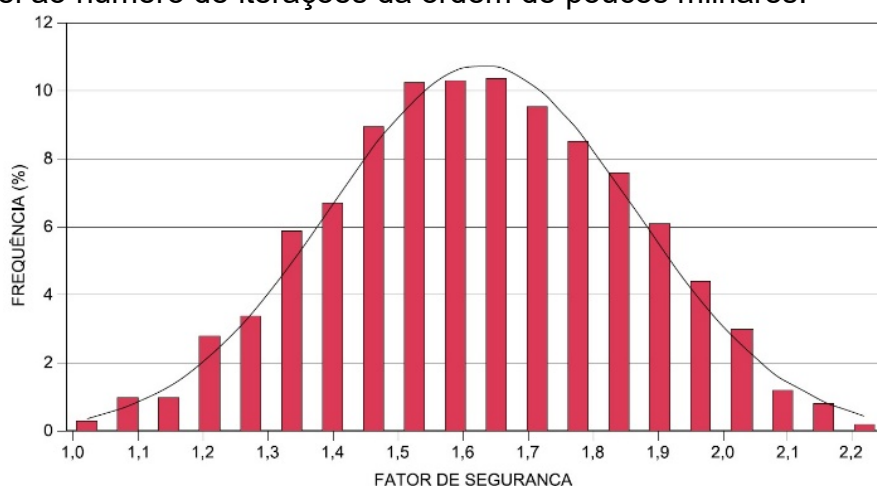


Figura 2 - Gráfico de Distribuição de Probabilidade do Fator de Segurança (FS).

2.3 Critérios de Aceitação

O fator de segurança para estabilidade deve ser analisado para as diversas condições de carregamento definidas para o maciço da barragem. A ELETROBRAS (2003) define como coeficiente de segurança mínimo 1,5 para regime permanente de operação do reservatório, e para os demais casos o valor de 1,3.

Para as análises probabilísticas de estabilidade de taludes, a literatura técnica apresenta alguns critérios quanto aos níveis de desempenho esperados em função da probabilidade de ruptura e do índice de confiabilidade e, entre eles, algumas variações.

De acordo com U.S. Army Corps of Engineers – USACE (2003), os níveis de desempenho esperado são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Probabilidade de ruptura (Pr) recomendados por USACE (2003).

Nível de desempenho	β	Pr
Alto	5,0	$2,871 \times 10^{-7}$
Bom	4,0	$3,169 \times 10^{-5}$
Acima da média	3,0	0,00135
Abaixo da média	2,5	0,00621
Pobre	2,0	0,02275
Insatisfatório	1,5	0,06681
Perigoso	1,0	0,15866

Dell'Avanzi e Sayão (1998) também apresentam os limites de risco admissíveis propostos para os projetos de engenharia, conforme Tabela 2.

Tabela 2. Probabilidade de ruptura (Pr) recomendados por Dell'Avanzi e Sayão.

Casos	β	Pr
Fundações	2,3 a 3,0	10^{-2} a 10^{-3}
Taludes de mineração	1,0 a 2,3	10^{-1} a 10^{-2}
Barragens	3,5 a 5,0	10^{-3} a 10^{-5}
Estruturas de contenção	2,0 a 3,0	10^{-2} a 10^{-3}

Santamarina (1992) estabelece os valores de probabilidade de ruptura aceitável de um talude de acordo com as condições impostas ao mesmo, como mostra a tabela 3.

Tabela 3. Probabilidade de ruptura (Pr) recomendados por Santamarina (1992).

Condições	Pr
Estruturas temporárias com baixos custos em reparações	10^{-1}
Nenhuma consequência de ruptura, alto custo para manter baixa a Pr	1 ou 2 (10^{-1})
Baixas consequências de ruptura	10^{-2}
Cortes existentes em rodovias interestaduais	1 ou 2 (10^{-2})
Aceitável na maioria dos casos, exceto se vidas fossem perdidas	10^{-3}
Aceitável para a maioria dos taludes	10^{-4}
Desnecessariamente baixos	10^{-5}

Como pode ser observado não existe um critério universal associado a probabilidade de ruptura de um talude, mas sim propostas consagradas por alguns autores que conseguem alcançar valores próximos ao que significa um número de desempenho satisfatório ou não.

3 Aplicação na Barragem da Margem Esquerda da PCH João Borges

3.1 Localização

A PCH João Borges localiza-se na bacia do Rio Uruguai no Rio Caveiras, entre os Municípios de São José do Cerrito e Campo Belo do Sul em Santa Catarina. As coordenadas geográficas da barragem são: Latitude: 27°43'00" S e Longitude: 50°39'30" W. As coordenadas geográficas da casa de força são: Latitude 27°42'55" S e Longitude 50°40'19" W.

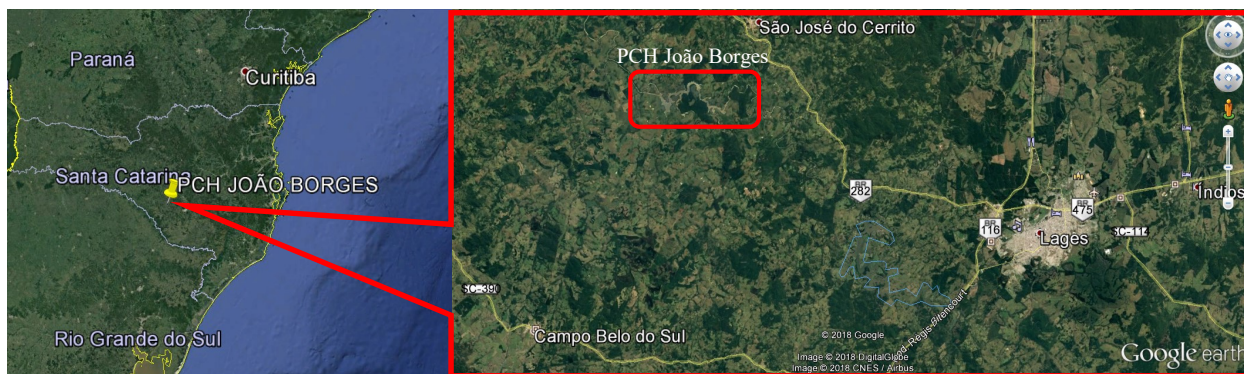


Figura 3 – Localização da PCH João Borges.

3.2 Dados do Projeto

A PCH João Borges possui uma área de drenagem de 2.272 km², com uma queda bruta máxima de 35,85 m e potência instalada de 19 MW. Possui vazão de projeto (TR= 1000 anos) 1.935 m³/s e vazão excepcional (TR= 10.000 anos) 2.511 m³/s. Sua vazão máxima turbinável é de 66,36 m³/s para as três turbinas (Francis simples eixo horizontal).

3.3 Arranjo Geral

O arranjo geral prevê um Barramento (a.), cuja água é desviada através de um Canal de Adução (c.) até a tomada d'água (d.), sendo conduzida no conduto forçado (e.) até a Casa de Força (f.), onde há a geração de energia através das três unidades geradoras. Após passar pelas unidades geradoras a água retorna ao Rio através do canal de fuga (g.). A alça de vazão reduzida (b.) é mantida através de um orifício de vazão ecológica, situado no centro do Barramento. Além disso, toda vazão que não for turbinada será vertida para seguir no leito natural do rio.



Figura 4 – Arranjo Geral da PCH João Borges.

3.4 Descrição da Barragem de Terra Margem Esquerda

A barragem de terra na margem esquerda é composta em seu maciço por solo compactado com espaldar a montante protegido por enrocamento de proteção entre as elevações 769,50 e 776,00m, a jusante foi protegido com revestimento vegetal (grama em placas).

O sistema de drenagem do maciço é constituído por Filtro vertical de Areia natural/artificial capaz de aliviar e abater a linha freática formada pelo estabelecimento do reservatório. As águas coletadas pelo Filtro vertical serão conduzidas ao pé de jusante por um filtro drenante horizontal também constituído de areia que disciplinará a saída das águas de percolação.

A crista da barragem tem 6m de largura e encontra-se posicionada na elevação 776,00m o que resulta numa altura máxima da barragem da ordem de 22m, seu talude de montante possui inclinação 1(V):2(H) e o de jusante inclinação 1(V):1,75(H) com bermas de 3,00m de largura nas elevações 760,00 e 768,00m.

A fundação da Barragem estará na sua grande maioria sobre solo residual de basalto (solo argiloso siltoso), somente no encontro com o muro de concreto a fundação estará em rocha.

O zoneamento dos materiais é apresentado através das figuras abaixo onde mostra a planta e a seção detalhada da barragem, com a distribuição dos diversos materiais ao longo do seu eixo principal conforme preconizado no Projeto Executivo.

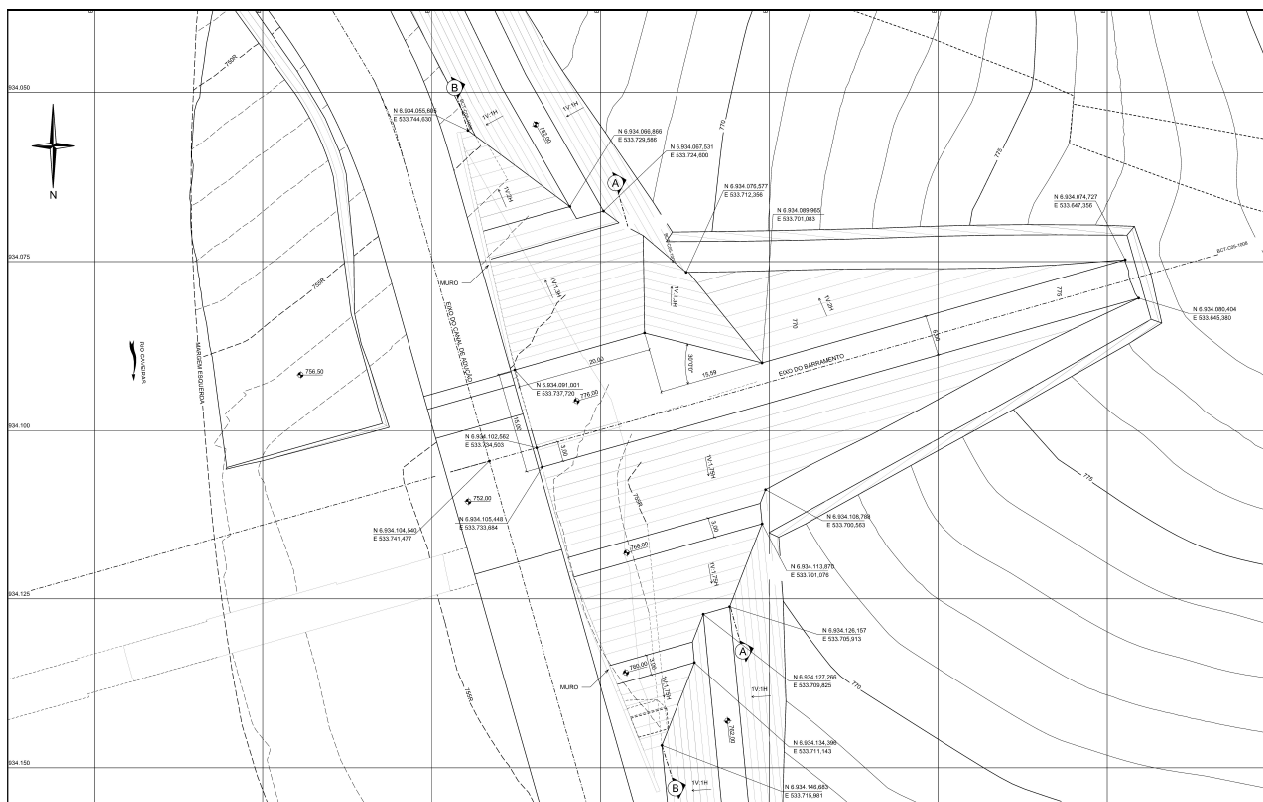


Figura 5 - Planta da barragem de terra na margem esquerda.

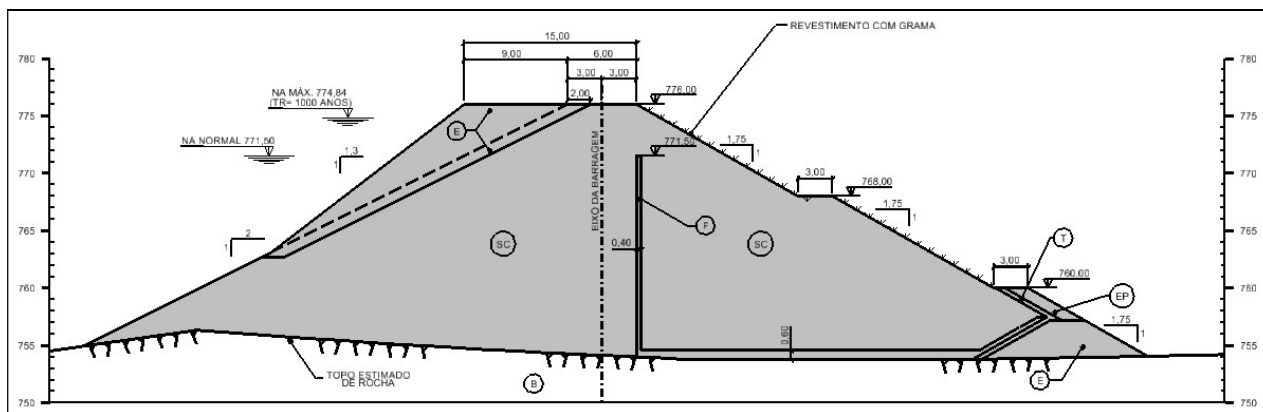


Figura 6 – Seção típica da barragem de terra na margem esquerda.

3.5 Parâmetros Geotécnicos dos Materiais

Para a execução do maciço em solo da barragem utilizou-se dois tipos de jazidas, de onde foi retirado amostra para ensaio em laboratório a fim de verificar a competência geomecânica do mesmo para a execução do corpo do aterro da barragem.

Para a composição das análises de estabilidade na fase de projeto executivo foram utilizados os dados com base nas envoltórias de resistência em termos de tensões totais (c e ϕ) e efetivas (c' e ϕ').

Tabela 4 - Parâmetros geotécnicos dos materiais utilizados.

Material	Peso Específico γ (kN/m ³)	Âng. de atrito efetivo ϕ' (°)	Coesão Efetiva c' (kPa)	Coef. Permeab. K (cm/s)
Solo Residual de Basalto (SB)	18	25	24	10 ⁻⁵
Solo Compactado (SC)	18	15 – 34 (*)	10 – 65 (*)	10 ⁻⁶
Filtro (F)	18	35	0	10 ⁻²
Transição (T)	20	40	0	10 ⁻³
Enrocamento de Proteção (EP)	21	42	0	10 ⁻¹
Enrocamento (E)	21	42	0	10 ⁻¹
Maciço Rochoso de Basalto (B)	25	45	500	10 ⁻⁴

(*) – Valores mínimos e máximos considerados para as jazidas utilizadas, verificados em ensaios e referência bibliográfica dos solos próximo da PCH João Borges na região.

3.6 Condições de Carregamentos Utilizados nas Análises de Estabilidade

O paramento de montante foi avaliado em quatro situações distintas.

- Regime Permanente de Operação: nessa análise, considera-se o N.A. Normal a montante igual a 771,50 m;
- Final de construção: ausência de água a montante e jusante, e redução da resistência ao cisalhamento pela ação de excesso de poro-pressão no selo argila silte-arenosa, indicada pelo parâmetro ru ;
- Rebaixamento rápido do reservatório: considera-se nesse caso o N.A. a montante na elevação 771,50 m, adotou-se a condição extrema em que ocorre a elevação da linha freática no maciço até a elevação no nível d'água máximo enquanto o nível de água do reservatório já retornou às condições normais.
- Carregamento Excepcional: nessa análise, considera-se o N.A. Máx. Máx. a montante igual a 775,40 m.

O paramento de jusante foi avaliado em três situações distintas de carregamento:

- Regime Permanente de Operação: nessa análise, considera-se o N.A. Normal a montante igual a 771,50 m;
- Final de construção: ausência de água a montante e jusante, e redução da resistência ao cisalhamento pela ação de excesso de poro-pressão no selo argila silte-arenosa, indicada pelo parâmetro ru ;
- Rebaixamento rápido do reservatório: considera-se nesse caso o N.A. a montante na elevação 771,50 m, adotou-se a condição extrema em que ocorre a elevação da linha freática no maciço até a elevação no nível d'água máximo enquanto o nível de água do reservatório já retornou às condições normais.
- Carregamento Excepcional: nessa análise, considera-se o N.A. Máx. Máx. a montante igual a 775,40 m.

3.7 Análise de Estabilidade

Previamente foram realizadas as análises de percolação, através do software Seep/W, da GeoStudio, que utiliza o método dos elementos finitos para modelar o fluxo da água e a pressão exercida pela mesma no maciço e fundação da barragem. Com a determinação das linhas freáticas e, conseqüentemente, da porção saturada da seção do barramento estudado, se deu início as análises de estabilidade dos taludes da barragem, visando à verificação da segurança para a ruptura global do maciço. Para a realização destas análises foi utilizado o programa Slope/W, da GeoStudio, que se baseia nos métodos de equilíbrio limite para determinar as superfícies críticas de ruptura dos taludes.

Para analisar a estabilidade dos taludes de montante e jusante da barragem, através do método probabilístico de simulação Monte Carlo, foi considerado a variabilidade dos parâmetros geomecânicos do material solo compactado (coesão e ângulo de atrito). Estes valores foram resultados dos ensaios provenientes da jazida de solo investigada e referências bibliográficas de ensaios de solos existentes próximo a região. Desta forma, serviram como parâmetros de entrada da análise valores estatísticos de variação mínima e máxima, média e desvio padrão dos parâmetros de resistência do solo, considerados variáveis naturais.

Para realizar as análises de estabilidade, foram impostas as condições de carregamento da mesma, de maneira a verificar o comportamento da barragem diante as solicitações que a ela são impostas, com a condição normal de reservatório e as condições críticas de operação e construção.

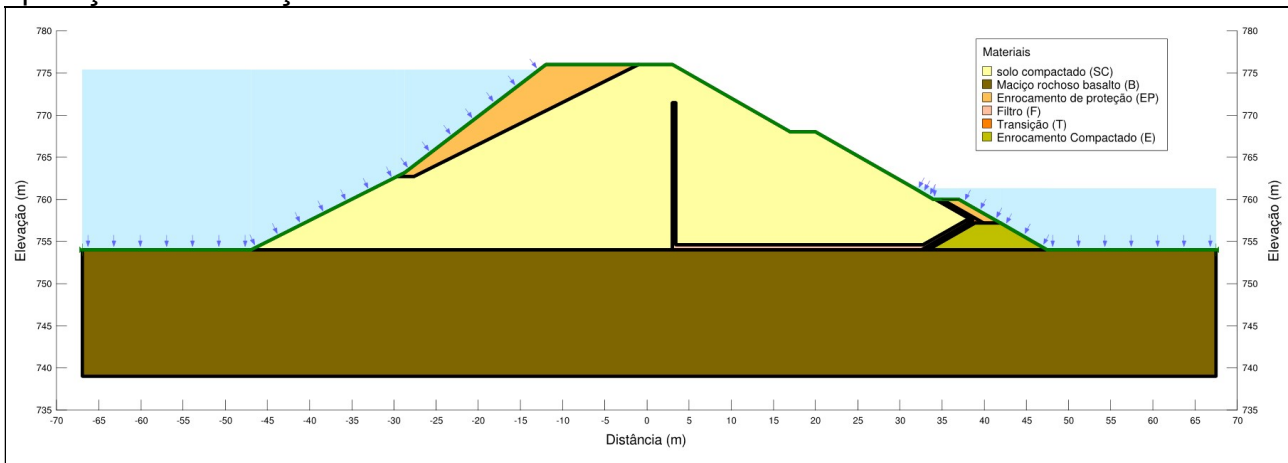


Figura 7 – Seção típica para análise de estabilidade da Barragem PCH João Borges.

A simulação Monte Carlo realizada, contou com um número de 4.500 interações, de modo a apresentar resultados confiáveis para o modelo analisado. Os valores de fator de segurança determinísticos são automaticamente fornecidos com a realização da análise probabilística, onde consideram como parâmetros fixos o valor médio dos parâmetros de resistência do solo do maciço da barragem. Os resultados das análises com o fator de segurança médio serão apresentados nas figuras a seguir.

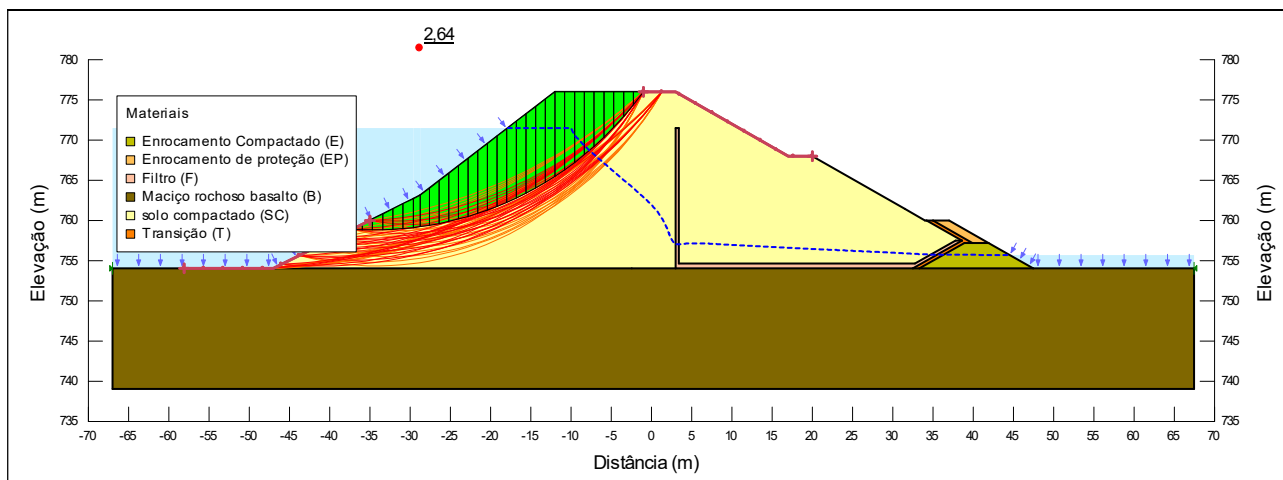


Figura 8 – Análise de estabilidade – Regime Permanente de Operação Montante.

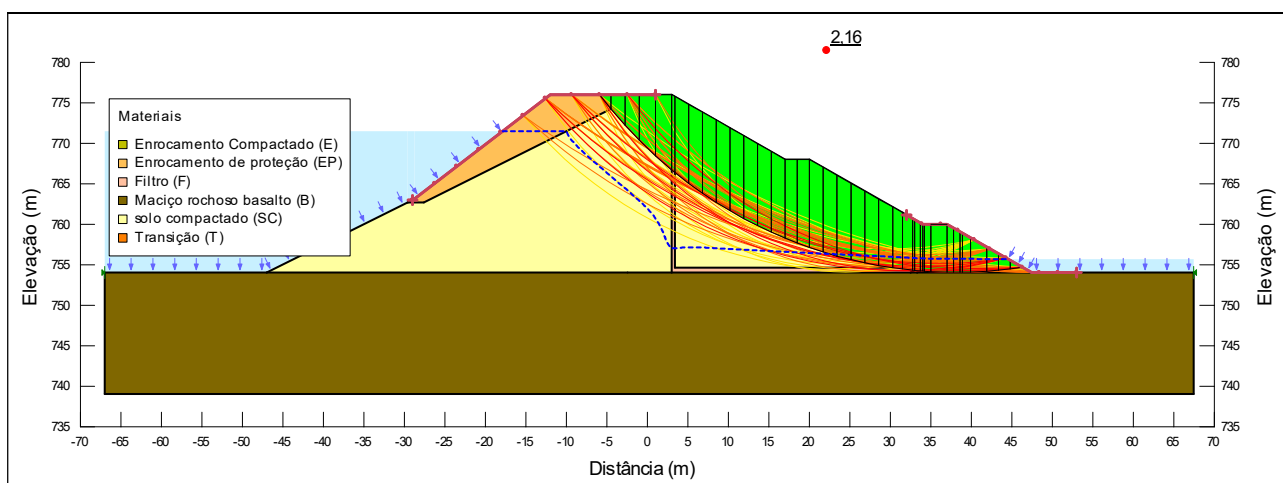


Figura 9 - Análise de estabilidade – Regime Permanente de Operação Jusante.

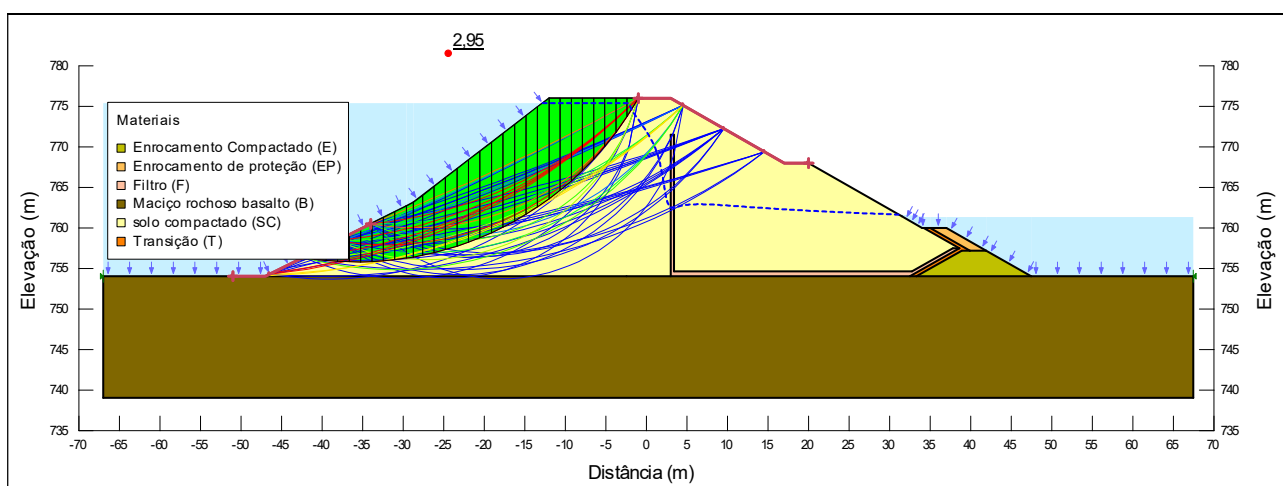


Figura 10 - Análise de estabilidade – Carregamento Excepcional Montante.

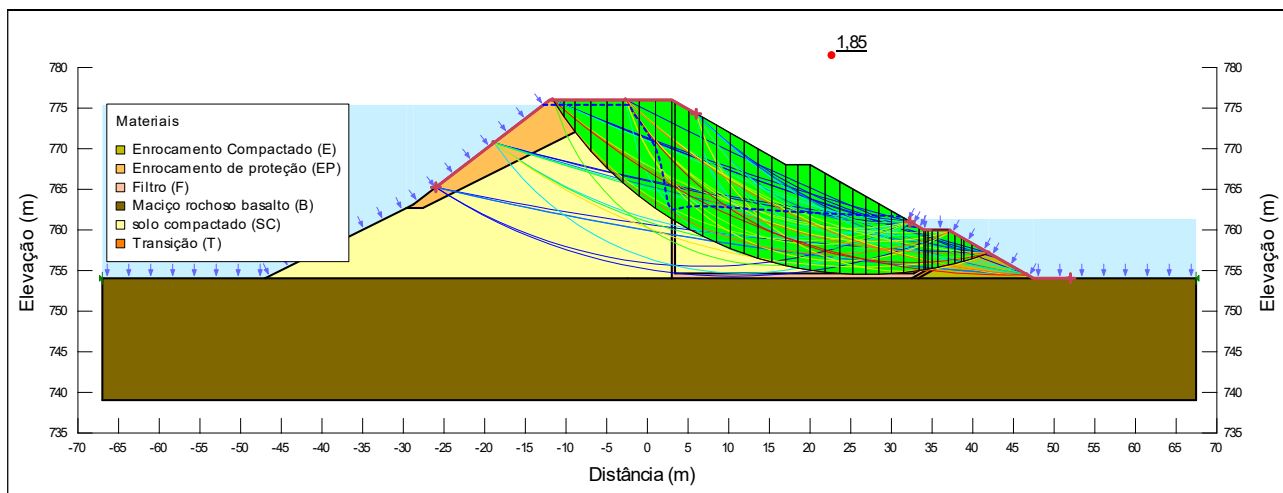


Figura 11 - Análise de estabilidade – Carregamento Excepcional Jusante.

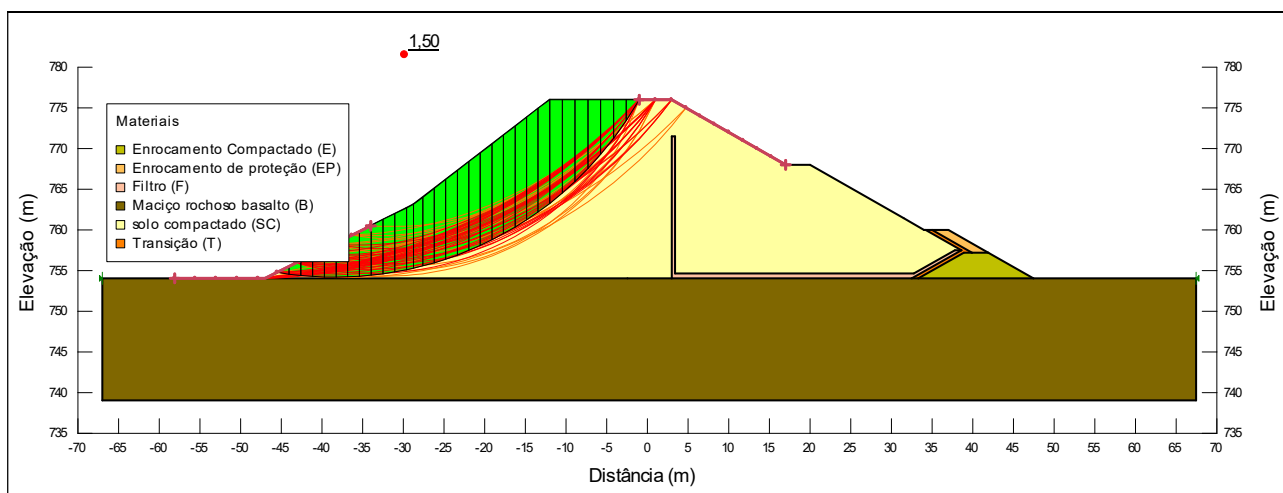


Figura 12 - Análise de estabilidade – Final de Construção Montante.

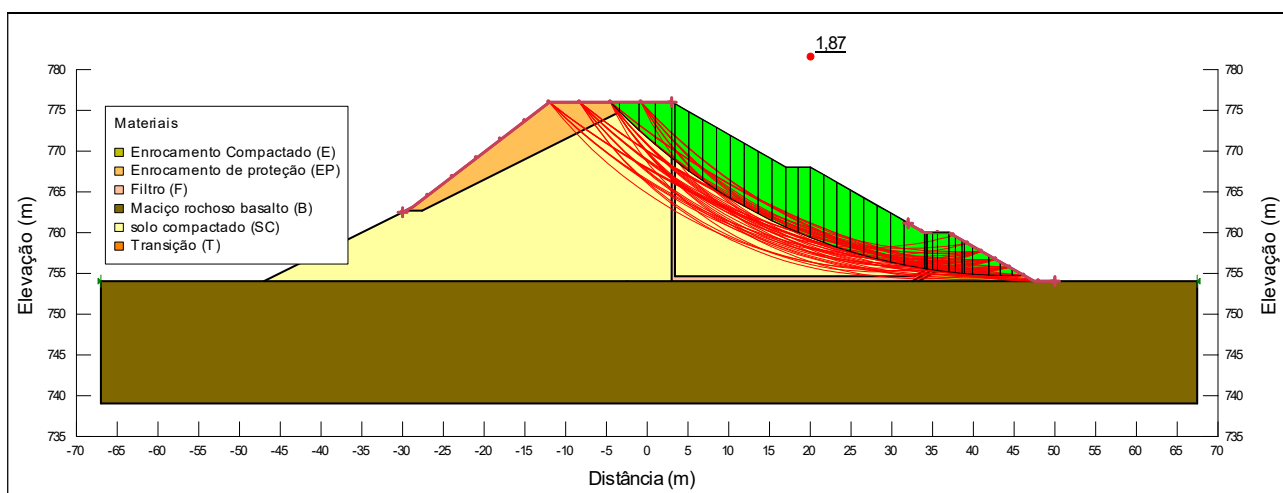


Figura 13 - Análise de estabilidade – Final de Construção Jusante.

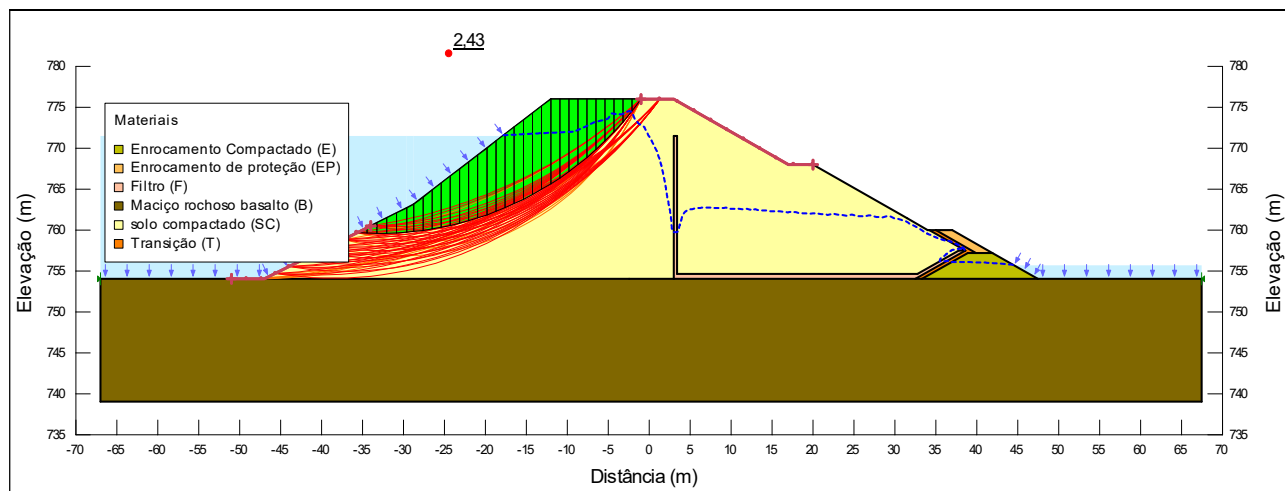


Figura 14 - Análise de estabilidade – Rebaixamento Rápido Montante.

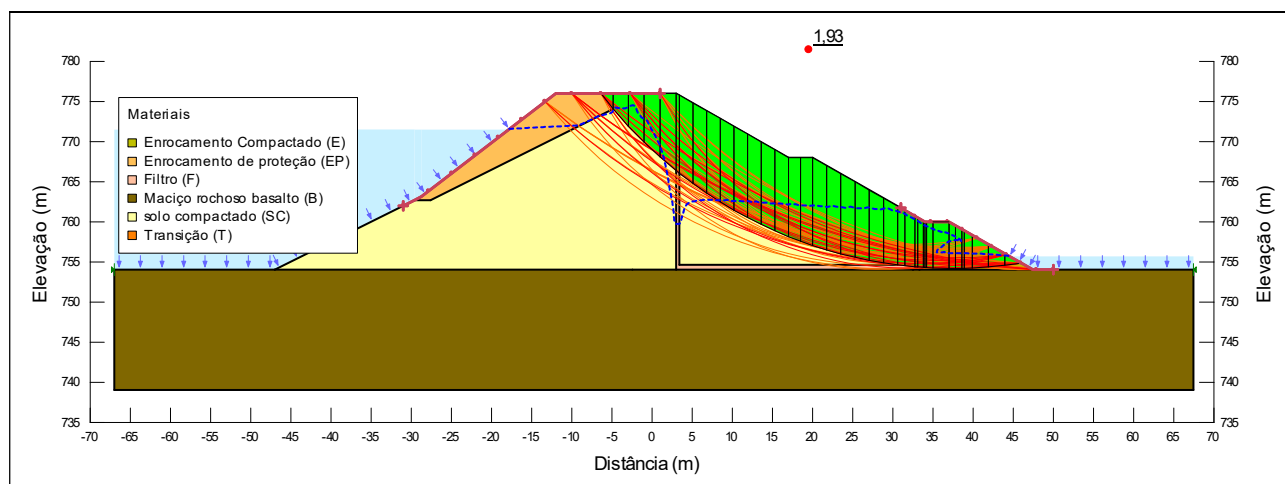


Figura 15 – Análise de estabilidade – Rebaixamento Rápido Jusante.

Os valores probabilísticos são fornecidos por meio de tabelas, compreendendo resultados de fator de segurança mínimo, médio e máximo, desvio padrão do fator de segurança médio, índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura do meio analisado. Ainda, fornecem a curva de distribuição de frequências dos fatores de segurança calculados e a função de probabilidade de ocorrência dos mesmo.

Tabela 5 - Resumo dos Resultados da Análise Probabilística (Fernandes, 2018)

Condição	Talude	FS _{méd}	β	Pr
Regime	Montante	2,6877	3,09	0%
Permanente	Jusante	2,1753	4,12	0%
Carregamento	Montante	2,9978	3,32	0%
Excepcional	Jusante	1,8669	3,37	0%
Final de	Montante	1,4816	1,69	3,24%
Construção	Jusante	1,8934	2,95	0%
Rebaixamento	Montante	2,4759	2,80	0%
Rápido	Jusante	1,9463	3,53	0%

Os valores de fator de segurança (FS_{méd}) e probabilidade de ruptura (Pr) destacados não alcançaram desempenho suficiente para aceitação de acordo com os critérios

encontrados na literatura. Os demais valores são considerados satisfatório e atendem os requisitos mínimos para suas condições.

O fator de segurança médio (FS_{méd}) indica estatisticamente a solução com maior probabilidade de ocorrer na obra, sendo apresentado com maior frequência entre os resultados obtidos diante todas as iterações realizadas, através das curvas de distribuição geradas. Os fatores de segurança encontrados estão de acordo com os limites impostos pelos critérios de aceitação, com exceção da condição de Final de Construção. Esta condição considera as poropressões atuantes no maciço de solo da barragem, ocasionando uma redução dos valores de resistência do solo neste estágio.

A probabilidade de ruptura (*Pr*) determina a probabilidade do fator de segurança estabelecido para o talude ser inferior a 1, indicando deste modo a ruptura do mesmo. Para as análises realizadas, os taludes que apresentaram alguma probabilidade de ruptura excederam os limites de aceitação, apresentando assim desempenho insuficiente. Este fato pode ser atribuído a grande variabilidade apresentada pelos parâmetros de resistência do solo, que demonstraram alguns valores muito abaixo dos demais, responsáveis diretos por baixar o valor da média gerada e elevar o desvio padrão da amostra. A condição desfavorável ocorreu na situação de Final de Construção montante, alcançando valor de probabilidade de ruptura igual a 3,24%.

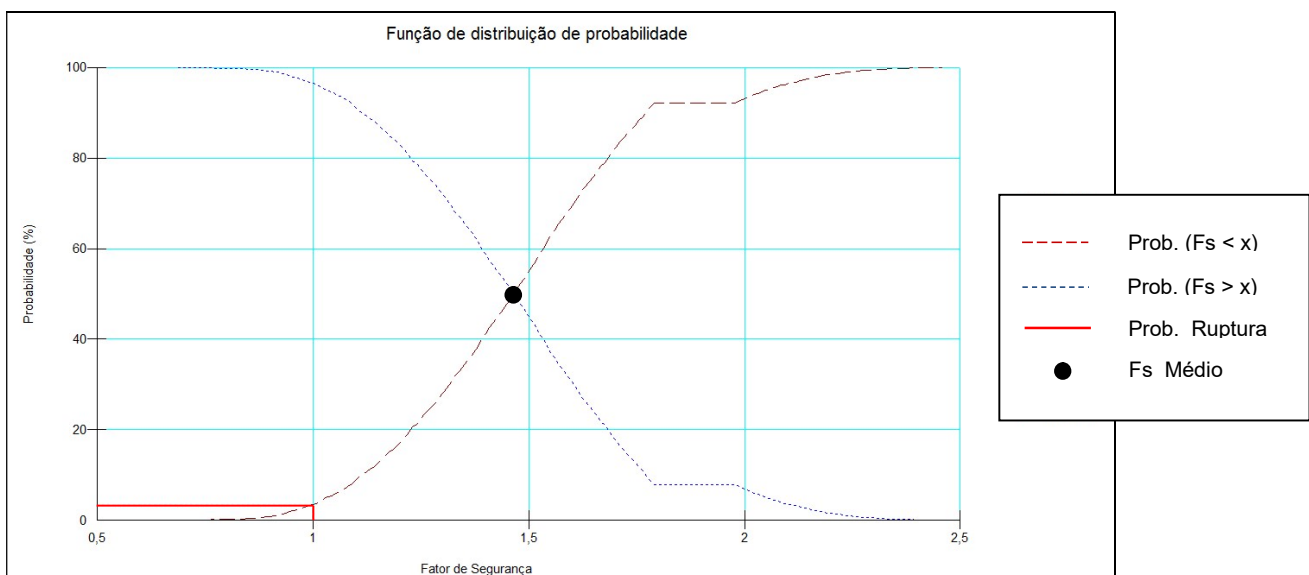


Figura 16 - Função de Densidade de Probabilidade para situação de Final de Construção montante.

Realizadas as análises de estabilidade dos taludes para as condições de carregamento impostas, avaliou-se os resultados obtidos de acordo com os critérios de aceitação, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Avaliação da probabilidade de ruptura (Pr).

Condição de Carregamento	Talude	Pr (%)	Pr	FS requerido		
				Sayão	USACE	Santamarina
Regime Permanente	Montante	0,00	0,00	10⁻³	10⁻³	10⁻⁴
	Jusante	0,00	0,00			
Carregamento Excepcional	Montante	0,00	0,00			
	Jusante	0,00	0,00			
Final de Construção	Montante	3,24	3,24.10⁻²			
	Jusante	0,00	0,00			
Rebaixamento Rápido	Montante	0,00	0,00			
	Jusante	0,00	0,00			

3.8 Considerações Finais

Em uma análise de estabilidade de taludes de uma obra geotécnica as características de resistência de um material representam variáveis de extrema importância, influenciando diretamente na solução exposta. Atribuir um valor fixo para cada característica do solo pode tornar a análise pouco representativa com o que condiz a realidade.

A abordagem probabilística para análise de estabilidade de taludes adota uma metodologia capaz de superar alguns obstáculos impostos ao Engenheiro no momento de verificar a condição de segurança de uma estrutura projetada. Os métodos probabilísticos auxiliam no entendimento das principais origens de risco associadas ao projeto, permitindo assim maior racionalidade ao Engenheiro no processo de tomada de decisão. Desta forma, torna-se uma alternativa mais precisa e segura em relação aos modelos determinísticos comumente utilizados pelos profissionais de Engenharia para verificação de estabilidade de taludes.

Para a barragem da PCH João Borges analisada neste trabalho, observaram-se os resultados expostos pela análise probabilística de estabilidade de taludes através do método da simulação Monte Carlo, considerando os parâmetros das jazidas investigadas para a composição do maciço de solo da barragem. Ao realizar esta consideração, a amostra de dados para cada parâmetro considerado na análise apontou uma variabilidade muito grande dos valores, com alguns valores muito abaixo dos demais, fator que corroborou com a redução da média estatística da amostra e o alto valor de desvio padrão dos dados.

Os valores apresentados pela análise probabilística de Fator de Segurança Médio foram superiores aos critérios de aceitação para a maioria dos carregamentos analisados. Para a probabilidade de ruptura dos taludes, os valores, quando encontrados, ultrapassaram os limites aceitáveis, tendo o caso de Final de Construção como o mais crítico, alcançando valor de probabilidade de ruptura de 3,24% ou $3,24 \times 10^{-2}$. Esta condição apresentou desempenho inferior aos demais devido ao fato de ser analisada em termos de tensões totais, considerando a pressão neutra atuante no maciço de solo da barragem havendo, portanto, uma redução dos parâmetros de resistência do solo.

A probabilidade de ruptura abaixo do critério de aceitação para condição de Final de Construção foi aceita durante a etapa de Projeto por se tratar de uma condição provisória, só ocorreria durante a fase construtiva e em um pequeno intervalo de tempo.

A análise probabilística demonstra-se um método mais seguro e racional para analisar a estabilidade de taludes, onde fornece informações acerca dos resultados e proporciona maior sensibilidade quanto à consideração dos parâmetros e condições apresentadas.

Desta forma para a barragem da PCH João Borges, os resultados expostos determinaram que os níveis de segurança à ruptura dos taludes são atendidos em todas as condições de carregamento impostas quando consideradas a variabilidade dos parâmetros geotécnicos do solo das jazidas para a composição do maciço da barragem.

4 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Estabilidade de encostas** – ABNT. NBR 11628, 2008.

CBDB – COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **A História das Barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: Cinquenta Anos do Comitê Brasileiro de Barragens**. Sindicato nacional dos editores de livros: Rio de Janeiro, 2011. 522p.

COSTA, W. D. **Geologia de Barragens**. 1ª Ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012. 352p.

Cruz, P.T. (2004). 100 **Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção**, 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, p. 648.

DE SOUZA, V.A. D.; VIEIRA, V. P. P. B. **Análise probabilística do talude de jusante de uma barragem de terra em regime de operação**. Comitê Brasileiro de Barragens. XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Belém, Pará, 2007.

DEEL' AVANZI, E. E SAYÃO, A. S. (1998). **Avaliação da Probabilidade de Ruptura de Taludes, Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG)**, Brasília.

EL-RAMLY, H. (2001). **Probabilistic Analyses of Landslide Hazards and Risks: Bridging Theory and Practice**. PHD Thesis (Doctor of Philosophy in Geotechnical Engineering), Faculty of Graduate Studies and Reserch, Departament of Civil and Environmental Engineering, Canadá.

ELETROBRÁS, (2003). **Diretrizes para Estudos de Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**, Centrais Hidrelétricas Brasileiras S. A., p. 279.

ELETROBRÁS, (2003). **Critérios de Projetos Cíveis de Usinas Hidrelétricas**, Centrais Hidrelétricas Brasileiras S. A., p. 279.

FARIAS, M. M.; ASSIS, A. **Uma comparação entre métodos probabilísticos aplicados a estabilidade de taludes**. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG. Brasília, 1998.

FLORES, E. A. F. **Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes Considerando a Variabilidade Espacial do Solo**. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

GEO-SLOPE International Ltd. (2008), **Stability Modeling with SLOPE/W 2007**. Version – Na Engineering Methodology. Vol. 3. Calgary, Canada, 367p.

PEREIRA, T. S. **Avaliação do desempenho de diferentes métodos de análise de estabilidade de taludes em barragens de terra**. Dissertação de mestrado. Universidade de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2003.

SANTAMARINA, P.J. (1992). **Reliability of Slopes: Incorporating Qualitative Information**, Transportation Research Record 1343, Rockfall, Prediction, Control and Landslide Case Histories.

SANDRONI, S.S. E SAYÃO, A.S. (1992). **Avaliação Estatística do Coeficiente de Segurança de Taludes**, In: 1ª Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, COBRAE, ABMS, Rio de Janeiro.

USACE – U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Slope Stability Manual**, EM 1110-2-19023, Washington, 2003.