

Dissertação de Mestrado

**METODOLOGIA DE GESTÃO DE RISCOS DE
BARRAGEM DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DE
MINÉRIO COM VISTAS À FISCALIZAÇÃO.**

AUTORA: ANA PAULA MAGALHÃES TAVARES

NUGEO

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antônio Maria Claret (UFOP)

COORIENTADOR: Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira (UFOP)

ESCOLA DE MINAS / UFOP

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA UFOP

OURO PRETO – OUTUBRO DE 2020

Ana Paula Magalhães Tavares

**METODOLOGIA DE GESTÃO DE RISCO DE BARRAGENS DE REJEITOS
DE MINÉRIO COM VISTAS À FISCALIZAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Geotécnica**

Área de concentração em Geotecnia Aplicada à Mineração.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antônio Maria Claret (UFOP)

COORIENTADOR: Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira (UFOP)

Ouro Preto
2020

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

T231m Tavares, Ana Paula Magalhães .

Metodologia de gestão de risco de barragens de rejeitos de minério com vistas a fiscalização. [manuscrito] / Ana Paula Magalhães Tavares. - 2020.

229 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Antonio Maria Claret de Gouveia.

Coorientador: Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira.

Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica.

1. Barragens de rejeitos. 2. Avaliação de risco. 3. Mineração. I. Ferreira, Lucas Deleon . II. de Gouveia, Antonio Maria Claret. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624.13

Bibliotecário(a) Responsável: Angela Maria Raimundo - SIAPE: 1.644.803



FOLHA DE APROVAÇÃO

Ana Paula Magalhães Tavares

Metodologia de Gestão de Risco de Barragens de Rejeitos de Minério com vistas à Fiscalização

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Geotécnica**, área de concentração em *Geotecnia Aplicada à Mineração*.

Aprovada em 30 de outubro de 2020

Membros da banca

Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira - co-orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. Cesar Falcão Barella - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. Eduardo Antônio Gomes Marques - (Universidade Federal de Viçosa)

Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira, co-orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 16/03/2021



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Deleon Ferreira, COORDENADOR(A) DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA GEOTÉCNICA**, em 16/03/2021, às 19:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0139370** e o código CRC **C63095EF**.

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, Eduardo e Elzi, ao meu
companheiro Marcelo, aos meus
primos Thiago e Danyella pelo apoio
incondicional e por sempre
acreditarem em mim.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente, a Deus, por iluminar o meu caminho durante a realização deste estudo.

Aos meus pais, Eduardo Tavares e Elzi Condé, pelo amor incondicional e apoio emocional nos momentos que mais precisei. Assim como meus pais, aos meus irmãos de coração Thiago Tavares e Danyella Marx, eu agradeço todo o apoio, acolhimento e cuidado que tiveram comigo, sempre incentivando a dar continuidade e finalizar os estudos.

Ao Marcelo, que foi meu grande companheiro nessa reta final, incentivando, ajudando e apoiando na elaboração do estudo, sempre com muito amor, carinho e paciência.

Ao meu coorientador, Prof. Lucas Deleon Ferreira, pela disponibilidade, atenção, apoio e orientação destinados para a realização deste trabalho. Sempre disponível e solícito nos momentos que mais precisei.

À toda equipe da DF+ Engenharia Geotécnica e Recursos Hídrico, pela troca de conhecimento, pela experiência adquirida e pelas oportunidades profissionais que enriqueceram ainda mais o estudo aqui apresentado

RESUMO

No processo de beneficiamento de minérios (ferro, ouro, nióbio e etc.) são gerados rejeitos que, muitas vezes, apresentam baixos teores de sólidos, impossibilitando a disposição destes materiais em pilhas e demandando seu armazenamento em reservatórios de barragens. Atualmente, os órgãos de fiscalização de barragens aplicadas à mineração classificam as barragens, de maneira subjetiva, baseadas em análises de documentação técnica e estimativa de danos potenciais. A proposta metodológica desse trabalho visa reduzir a subjetividade na avaliação do risco e propõe a necessidade de serem definidos níveis de riscos aceitáveis baseados nos estudos e aplicados pelas legislações internacionais. Serão apresentados 03 estudos de casos, de barragens hipotéticas. O desenvolvimento da análise de risco é realizado em cinco etapas sequenciais: identificação dos modos de falhas, cálculo da probabilidade de ruptura, mensuração das consequências e cálculo do risco. A partir dos modos de falhas definidos, devem ser realizadas análises probabilísticas por diversas metodologias existentes. Após esta etapa, cenários de hipotéticos de rupturas (*dam break*) são simulados. Com a definição da mancha de inundação, foram realizados inventários com o levantamento das consequências. Por fim, tem-se uma estimativa de risco que é comparado ao risco aceitável proposto. Os riscos das barragens estudadas foram mensurados e classificados conforme metodologia proposta nesse estudo, que comparados aos resultados da classificação de risco da Agência Nacional de Mineração, percebe-se que as barragens apresentam condições de risco distintas, porém na ANM apresentam a mesma classificação segundo os seus critérios.

Palavras-chave: barragens de rejeito; análise de risco; gestão de risco; mineração.

ABSTRACT

In the process of processing ores (iron, gold, niobium, etc.), tailings are generated, which often have low levels of solids, making it impossible to dispose of these materials in piles and demanding their storage in dam reservoirs. Currently, the inspection agencies of dams applied to mining classify the dams, subjectively, based on analysis of technical documentation and estimation of potential damage. The methodological proposal of this work aims to reduce subjectivity in risk assessment and proposes the need to define acceptable levels of risks based on the studies and applied by international legislation. 03 case studies of hypothetical dams will be presented. The development of risk analysis is carried out in five sequential steps: identification of failure modes, calculation of the probability of rupture, measurement of consequences and calculation of risk. Based on the defined failure modes, probabilistic analyzes must be carried out using several existing methodologies. After this stage, hypothetical dam break scenarios are simulated. With the definition of the flood spot, inventories were carried out with a survey of the consequences. Finally, there is a risk estimate that is compared to the proposed acceptable risk. The risks of the studied dams were measured and classified according to the methodology proposed in this study, which, compared to the results of the risk classification of the National Mining Agency, we perceive It is known that the dams present different risk conditions, however in the ANM they present the same classification according to their criteria.

Keywords: tailings dams; risk; risk management, ANM, mining

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Conceito de Risco (CETESB, 2011)..... | 13 |
| Figura 2.2 - Atividades fundamentais da gestão de risco | 15 |
| Figura 2.3 – Fluxograma proposto pela CETESB (2011). | 17 |
| Figura 3.1 – Esquema para verificação dos modos de falhas..... | 30 |
| Figura 3.2 – Distribuição Normal..... | 47 |
| Figura 3.3 – Critério de tolerabilidade para risco (CETESB, 2011). | 60 |
| Figura 3.4 – Critério de aceitabilidade do risco (ANCOLD, 1994). | 61 |
| Figura 3.5 – Critério de Risco aceitável CDA (2007). | 62 |
| Figura 3.6 – Critérios de aceitabilidade do risco. a) Austrália (ANCOLD) e b) EUA (USBR). | 63 |
| Figura 3.7 - Gráfico de avaliação de risco adotados pelo U.S Bureau of Reclamation. | 64 |
| Figura 3.8 - Gráfico de avaliação de risco adotado pelo U.S. Army Corps of Engineers..... | 65 |
| Figura 3.9 - Gráfico de avaliação de risco adotado pelo New South Wales Dam Safety Committee. | 66 |
| Figura 3.10 – Risco aceitável proposto pela Pimenta (2009). | 68 |
| Figura 4.1 - Seção típica - Projeto <i>As Built</i> da Barragem A..... | 77 |
| Figura 4.2 - Curva cota-volume do reservatório da barragem A..... | 79 |
| Figura 4.3 - - Curva de descarga do sistema extravasor da barragem A. | 80 |
| Figura 4.4 - Resultados do trânsito de cheias no reservatório da barragem A (PMP e duração crítica de 4 horas). | 81 |
| Figura 4.5 - Modelo para as análises de estabilidade – Freática atual. | 82 |
| Figura 4.6 - Resultado da Análise de estabilidade determinística na Cenário 2 – Condição Normal de Operação..... | 84 |
| Figura 4.7 - Resultado da Análise de estabilidade determinística na Cenário 2 – Condição Crítica | 85 |
| Figura 4.8 – Análise de Estabilidade – Variação a Coesão do solo amarelado – Cenário 1 e 2. | 89 |
| Figura 4.9 - Análise de Estabilidade – Variação do ângulo de atrito do solo amarelado – Cenário 1. | 89 |
| Figura 4.10 - Variação da coesão do solo avermelhado – Cenário 1. | 90 |
| Figura 4.11 - Variação do ângulo de atrito do solo avermelhado – Cenário 1..... | 90 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.12 - Variação da coesão do solo saprolítico – Cenário 1..... | 91 |
| Figura 4.13 - Variação do ângulo de atrito do solo saprolítico – Cenário 1..... | 91 |
| Figura 4.14 – Análise de Estabilidade – Variação da Coesão do solo amarelado – Cenário 2. | 92 |
| Figura 4.15 - Análise de Estabilidade – Variação do ângulo de atrito do solo amarelado – Cenário 2. | 93 |
| Figura 4.16 - Variação da coesão do solo avermelhado – Cenário 2. | 93 |
| Figura 4.17 - Variação do ângulo de atrito do solo avermelhado – Cenário 2..... | 94 |
| Figura 4.18 - Variação da coesão do solo saprolítico – Cenário 2..... | 94 |
| Figura 4.19 - Variação do ângulo de atrito do solo saprolítico – Cenário 2..... | 95 |
| Figura 4.20 - Porcentagem de contribuição dos parâmetros na variância de FS – Cenário 1. . | 95 |
| Figura 4.21 - Porcentagem de contribuição dos parâmetros na variância de FS – Cenário 2. | 96 |
| Figura 4.22 - Resultados das simulações de Monte Carlo – Cenário 1..... | 98 |
| Figura 4.23 - Resultados das simulações de Monte Carlo – Cenário 2..... | 99 |
| Figura 4.24 – Histograma dos Fatores de Segurança – Cenário 1..... | 99 |
| Figura 4.25 – Distribuição dos Fatores de Segurança em relação ao número de análises – Cenário 1. | 100 |
| Figura 4.26 – Probabilidade dos Fatores de Segurança – Cenário 1. | 100 |
| Figura 4.27 – Histograma dos Fatores de Segurança – Cenário 2..... | 101 |
| Figura 4.28 – Distribuição dos Fatores de Segurança em relação ao número de análises – Cenário 2. | 101 |
| Figura 4.29 – Probabilidade dos Fatores de Segurança – Cenário 2. | 101 |
| Figura 4.30 – Árvore de eventos – Erosão Interna pelo macio. | 102 |
| Figura 4.31 - Modelo de ruptura por erosão interna iniciado por sufusão. Erro! Indicador não definido. | |
| Figura 4.32 - Árvore de falhas 1 para o nó (a) da árvore de eventos para iniciação por instabilidade interna (sufusão)..... | 104 |
| Figura 4.33 - Granulometria da areia do filtro vertical..... | 106 |
| Figura 4.34 - Árvore de falhas 2 para o nó (c) da árvore de eventos. | 107 |
| Figura 4.35 - Árvore de falhas 3 para o nó (d) da árvore de eventos | 108 |
| Figura 4.36 - Árvore de falhas 4 para o nó (e) da árvore de eventos. | 109 |
| Figura 4.37 - Árvore de falhas 5 para o nó (f) da árvore de eventos..... | 111 |
| Figura 4.38 - Árvore de Eventos – Barragem A..... | 113 |
| Figura 4.39 - Modelo de ruptura por erosão regressiva pela fundação, a partir de Foster e Fell (1999). | 114 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.40 - Árvore de falhas 1 para o nó (a) da árvore de eventos | 115 |
| Figura 4.41 - Árvore de falhas 2 para o nó (c) da árvore de eventos. | 117 |
| Figura 4.42 - Árvore de falhas 3 para o nó (d) da árvore de eventos. | 118 |
| Figura 4.43 - Árvore de falhas 4 para o nó (e) da árvore de eventos | 119 |
| Figura 4.44 - Árvore de falhas 5 para o nó (f) da árvore de eventos. | 121 |
| Figura 4.45 – Risco Aceitável da Barragem A. | 123 |
| Figura 4.46 - Seção Geológica – Barragem B. | 126 |
| Figura 4.47 - Curva cota-volume do reservatório da barragem B. | 127 |
| Figura 4.48 - Curva cota-volume da barragem B. | 129 |
| Figura 4.49 - Curva de descarga do sistema extravasor da barragem B. | 130 |
| Figura 4.50 - Resultados do trânsito de cheias no reservatório da barragem B (PMP e duração crítica de 18 horas). | 132 |
| Figura 4.51 - Modelo para as análises de estabilidade – Barragem B. | 133 |
| Figura 4.52 - Modelo para as análises de estabilidade – Cenário 1. | 134 |
| Figura 4.53 - Modelo para as análises de estabilidade – Cenário 2. | 135 |
| Figura 4.54 - Análise de percolação para o Cenário 1: carga hidráulica total (m). | 136 |
| Figura 4.55 - Análise de percolação para o Cenário 2: carga hidráulica total (m). | 137 |
| Figura 4.56 - Resultado da Análise de estabilidade determinística na Cenário 1 – Condição Normal de Operação. | 138 |
| Figura 4.57 - Resultado da Análise de estabilidade determinística na Cenário 2 – Condição Crítica. | 138 |
| Figura 4.58 - Dispersão dos dados p x q. | 139 |
| Figura 4.59 - Convergência dos dados p x q. | 139 |
| Figura 4.60 - Acréscimo de 10% da coesão no solo compactado – Cenário 1. | 143 |
| Figura 4.61 - Acréscimo de 10% no ângulo de atrito do solo compactado – Cenário 1. | 143 |
| Figura 4.62 - Acréscimo de 10% da coesão do Filito Classe IV – Cenário 1. | 144 |
| Figura 4.63 - Acréscimo de 10% da coesão do ângulo de atrito Classe IV – Cenário 1. | 144 |
| Figura 4.64 - Acréscimo de 10% no ângulo de atrito do saprolito – Cenário 1. | 145 |
| Figura 4.65 - Acréscimo de 10% da coesão do Saprolito – Cenário 1. | 145 |
| Figura 4.66 - Parâmetros médios – Cenário 2. | 146 |
| Figura 4.67 - Acréscimo de 10% da coesão no solo compactado – Cenário 2. | 146 |
| Figura 4.68 - Acréscimo de 10% no ângulo de atrito do solo compactado – Cenário 2. | 147 |
| Figura 4.69 - Acréscimo de 10% da coesão do saprolito – Cenário 2. | 147 |
| Figura 4.70 - Acréscimo de 10% no ângulo de atrito do saprolito – Cenário 2. | 148 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.71 - Acréscimo de 10% da coesão do Filito Classe IV – Cenário 2. | 148 |
| Figura 4.72 - Acréscimo de 10% do ângulo de atrito do Filito Classe IV – Cenário 2..... | 149 |
| Figura 4.73 - Porcentagem de contribuição dos parâmetros na variância de FS – Cenário 1. | 149 |
| Figura 4.74 - Porcentagem de contribuição dos parâmetros na variância de FS – Cenário II. | 150 |
| Figura 4.75 - Resultados das simulações de Monte Carlo – Cenário 1..... | 152 |
| Figura 4.76 – Histograma dos Fatores de Segurança – Cenário 1..... | 152 |
| Figura 4.77 – Distribuição dos Fatores de Segurança em relação ao número de análises – Cenário 1. | 153 |
| Figura 4.78 – Probabilidade dos Fatores de Segurança – Cenário 1. | 153 |
| Figura 4.79 - Resultados das simulações de Monte Carlo – Cenário 2..... | 154 |
| Figura 4.80 – Histograma dos Fatores de Segurança – Cenário 2..... | 155 |
| Figura 4.81 – Distribuição dos Fatores de Segurança em relação ao número de análises – Cenário 2. | 155 |
| Figura 4.82 – Probabilidade dos Fatores de Segurança – Cenário 2. | 156 |
| Figura 4.83 – Árvore de eventos – Erosão Interna pelo maciço..... | 158 |
| Figura 4.84 - Modelo de ruptura por erosão interna por fluxo concentrado no contato com paredes de concreto. | 159 |
| Figura 4.85 - Árvore de falhas 1 para o nó (a) da árvore de eventos | 160 |
| Figura 4.86 - Árvore de falhas 2 para o nó (c) da árvore de eventos. | 162 |
| Figura 4.87 - Árvore de falhas 3 para o nó (d) da árvore de eventos | 163 |
| Figura 4.88 - Árvore de falhas 4 para o nó (e) da árvore de eventos | 165 |
| Figura 4.89 - Árvore de falhas 5 para o nó (f) da árvore de eventos..... | 167 |
| Figura 4.90 - Risco Aceitável da Barragem B..... | 169 |
| Figura 4.91 - Curva cota-área-volume de água no reservatório C..... | 172 |
| Figura 4.92 - Curva de descarga do sistema extravasor da Barragem C. | 174 |
| Figura 4.93 - Curva de descarga – Extravasor de Emergência (Trapezoidal)..... | 174 |
| Figura 4.94 - Resultados do trânsito de cheias no reservatório da barragem C (PMP e duração crítica de 18 horas). | 176 |
| Figura 4.95 - Curva cota-volume do reservatório da barragem C – borda livre nula..... | 177 |
| Figura 4.96 - Modelo para as análises de estabilidade – Barragem C. – Cenário 1 | 179 |
| Figura 4.97 - Modelo para as análises de estabilidade – Barragem C. – Cenário 2. | 179 |
| Figura 4.98 - Resultado da Análise de estabilidade determinística na Cenário 1 – Condição Normal de Operação..... | 182 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.99 - Resultado da Análise de estabilidade determinística na Cenário 2 – Condição Crítica. | 183 |
| Figura 4.100 – Análise de Estabilidade – Variação da coesão do Aterro de Reforço do cenário 1. | 187 |
| Figura 4.101 – Análise de Estabilidade – Variação do ângulo de atrito do Aterro de Reforço do cenário 1. | 188 |
| Figura 4.102 – Análise de Estabilidade – Variação da coesão do Aterro Atual I do cenário 1. | 189 |
| Figura 4.103 – Análise de Estabilidade – Variação do ângulo de atrito do Aterro Atual I do cenário 1. | 190 |
| Figura 4.104 – Análise de Estabilidade – Variação da coesão do Antigo Bota- Fora do cenário 1. | 191 |
| Figura 4.105 – Análise de Estabilidade – Variação Do ângulo de atrito do Antigo Bota- Fora do cenário 1. | 192 |
| Figura 4.106 - Porcentagem de contribuição dos parâmetros na variância de FS – Cenário I. | 192 |
| Figura 4.107 – Análise de Estabilidade – Variação da coesão do Aterro de Reforço do cenário 2. | 194 |
| Figura 4.108 – Análise de Estabilidade – Variação do ângulo de atrito do Aterro de Reforço do cenário 2. | 195 |
| Figura 4.109 – Análise de Estabilidade – Variação do ângulo de atrito do Aterro Atual I do cenário 2. | 196 |
| Figura 4.110 – Análise de Estabilidade – Variação da coesão do Aterro Atual I do cenário 2. | 197 |
| Figura 4.111 – Análise de Estabilidade – Variação da coesão do Antigo Bota- Fora do cenário 2. | 198 |
| Figura 4.112 – Análise de Estabilidade – Variação Do ângulo de atrito do Antigo Bota- Fora do cenário 2. | 199 |
| Figura 4.113 - Porcentagem de contribuição dos parâmetros na variância de FS – Cenário 2. | 199 |
| Figura 4.114 - Resultados das simulações de Monte Carlo – Cenário 1. | 202 |
| Figura 4.115 – Histograma dos Fatores de Segurança – Cenário 1. | 203 |
| Figura 4.116 – Distribuição dos Fatores de Segurança em relação ao número de análises – Cenário 1. | 203 |

| | |
|---|--------------------------------------|
| Figura 4.117 – Probabilidade dos Fatores de Segurança – Cenário 1..... | 204 |
| Figura 4.118 - Resultados das simulações de Monte Carlo – Cenário 2..... | 206 |
| Figura 4.119 – Histograma dos Fatores de Segurança – Cenário 2..... | 207 |
| Figura 4.120 – Distribuição dos Fatores de Segurança em relação ao número de análises – Cenário 2. | 207 |
| Figura 4.121 – Probabilidade dos Fatores de Segurança – Cenário 2..... | 208 |
| Figura 4.122 – Árvore de eventos – Erosão Interna pelo macio Barragem C..... | 210 |
| Figura 4.123 - Modelo de ruptura por erosão interna iniciado por fluxo concentrado ao longo do conduto enterrado. | Erro! Indicador não definido. |
| Figura 4.124 - Árvore de falhas 1 para o nó (a) da árvore de eventos | 212 |
| Figura 4.125 - Árvore de falhas 2 para o nó (c) da árvore de eventos. | 214 |
| Figura 4.126 - Árvore de falhas 3 para o nó (d) da árvore de eventos – Barragem C..... | 215 |
| Figura 4.127 - Árvore de falhas 4 para o nó (e) da árvore de eventos – Barragem C..... | 217 |
| Figura 4.128 - Árvore de falhas 5 para o nó (f) da árvore de eventos – Barragem C. | 219 |
| Figura 4.129 - Risco Aceitável da Barragem C..... | 221 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 - Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração (NBR 13028) | 6 |
| Tabela 3.1 – Principais causas associadas aos modos de falhas de barragens | 31 |
| Tabela 3.2 - Tempo de retorno mínimo a ser considerado para dimensionamento do sistema extravasor em função das consequências ou legislação vigente (NBR 13028) | 33 |
| Tabela 3.3 – Mecanismos Finais de Falha para o Caso de Erosão Interna pelo Maciço (segundo Fell et al., 2005) | 43 |
| Tabela 3.4 – Correspondência entre a Descrição Verbal da Chance de Ocorrência do Evento e o Valor de Probabilidade Adotado (Baseada em Vick, 1997; Lichtenstein & Newman, 1967 apud Baecher & Christian, 2003) | 43 |
| Tabela 3.5 - Formulação Aplicada aos Dados das Amostras | 46 |
| Tabela 3.6 - Valores Típicos de Coeficiente de Variação de Parâmetros Geotécnicos | 46 |
| Tabela 3.7 – Método FOSM | 50 |
| Tabela 3.8 – Processo Monte Carlo | 53 |
| Tabela 3.9 - Funções de Densidade de Probabilidade para Variáveis Aleatórias em Engenharia Geotécnica (USACE, 2006) | 55 |
| Tabela 3.10 - Risco aceitável por morte quando um indivíduo é exposto a diferentes tipos de acidentes (Gulvanessian et al.,2002, Apud Caldeira 2005) | 67 |
| Tabela 3.11 – Medidas para reduzir a probabilidade de ocorrer uma falha | 70 |
| Tabela 3.12 – Tabela de classificação(ANM, 2017) | 71 |
| Tabela 3.13 – Matriz de classificação – Característica Técnica | 72 |
| Tabela 3.14 – Matriz de classificação – Estado de Conservação | 73 |
| Tabela 3.15 – Matriz de classificação – Plano de Segurança | 74 |
| Tabela 3.16 – Matriz de classificação – Dano potencial associado | 75 |
| Tabela 3.17 – Classificação da barragem – Critério ANM | 76 |
| Tabela 4.1 - Ficha Técnica da Barragem A | 78 |
| Tabela 4.2 - Curvas cota-volume da barragem A | 79 |
| Tabela 4.3 - Resultados do trânsito de cheias no reservatório da Barragem A | 81 |
| Tabela 4.4 – Parâmetros Médios | 82 |
| Tabela 4.5 – Variabilidade dos parâmetros geotécnicos | 85 |
| Tabela 4.6 - Parâmetros do solo avermelhado | 86 |
| Tabela 4.7 – Parâmetros do solo amarelado | 87 |

| | |
|---|-----|
| <u>Tabela 4.8 – Parâmetros do Saprolito de Xisto Sericítico.</u> | 87 |
| <u>Tabela 4.9 - Parâmetros utilizados e resultados das análises de estabilidade.</u> | 87 |
| <u>Tabela 4.10 – Média, desvio-padrão e limites inferior e superior considerados.</u> | 97 |
| <u>Tabela 4.11 - Probabilidades de ocorrência de ruptura por instabilização.</u> | 102 |
| <u>Tabela 4.12 - Fatores de Influência na Probabilidade de Iniciação de Erosão Interna- Gradiente Hidráulico.</u> | 104 |
| <u>Tabela 4.13 - Fatores de Influência na Probabilidade de Sufusão em Solos sem Coesão (Foster and Fell, 2000 apud Fell, 2005).</u> | 105 |
| <u>Tabela 4.14 - Fatores de Influência na Probabilidade de Continuação do Processo Erosivo – Existência de Filtro no Ponto de Saída da Percolação.</u> | 105 |
| <u>Tabela 4.15 - Fatores de Influência na Probabilidade de Formação do Tubo - Habilidade em Suportar o Teto (modificado Foster & Fell, 2000 apud Fell et. al, 2005).</u> | 107 |
| <u>Tabela 4.16 - Fatores de Influência na Probabilidade de Progressão do Tubo - Erodibilidade (ao Longo do Fluxo) (modificado Foster & Fell, 2000 apud Fell et. al, 2005).</u> | 108 |
| <u>Tabela 4.17 - Fatores de Influência na Probabilidade de Progressão do Tubo - Limitação do Fluxo (modificado Foster & Fell, 2000 apud Fell et. al, 2005).</u> | 109 |
| <u>Tabela 4.18 - Fatores de Influência na Probabilidade de Incapacidade de Detecção e Intervenção - Efetividade do Ambiente de Controle.</u> | 110 |
| <u>Tabela 4.19 - Fatores de Influência na Probabilidade de Incapacidade de Detecção e Intervenção – Capacidade de Intervenção.</u> | 110 |
| <u>Tabela 4.20 - Fatores de Influência na Probabilidade de Formação de Brecha - Alargamento do Tubo (modificado Foster & Fell, 2000 apud Fell et. al, 2005).</u> | 111 |
| <u>Tabela 4.21 - Fatores de influência na probabilidade de início de erosão regressiva (gradiente hidráulico).</u> | 115 |
| <u>Tabela 4.22 - Fatores de influência na probabilidade de condições para o início do processo erosivo (erodibilidade ao longo da fundação), modificado de Foster e Fell (1999) apud Fell et. al. (2005).</u> | 115 |
| <u>Tabela 4.23 - Fatores de Influência na Probabilidade de Continuação do Processo Erosivo – Existência de Filtro no Ponto de Saída da Percolação.</u> | 116 |
| <u>Tabela 4.24 - Fatores de Influência na Probabilidade de Formação do Tubo - Habilidade em Suportar o Teto (modificado Foster & Fell, 2000 apud Fell et. al, 2005).</u> | 117 |
| <u>Tabela 4.25 - Fatores de Influência na Probabilidade de Progressão do Tubo - Erodibilidade da Fundação ao Longo do Fluxo (modificado Foster & Fell, 2000 apud Fell et. al, 2005).</u> .. | 118 |

| | |
|--|-----|
| <u>Tabela 4.26 - Fatores de Influência na Probabilidade de Progressão do Tubo - Limitação do Fluxo pela Fundação (modificado Foster & Fell, 2000 <i>apud</i> Fell <i>et. al.</i>, 2005).</u> | 119 |
| <u>Tabela 4.27 - Fatores de Influência na Probabilidade de Incapacidade de Detecção e Intervenção - Efetividade do Ambiente de Controle.</u> | 120 |
| <u>Tabela 4.28 - Fatores de Influência na Probabilidade de Incapacidade de Detecção e Intervenção – Capacidade de Intervenção.</u> | 120 |
| <u>Tabela 4.29 - Fatores de Influência na Probabilidade de Formação de Brecha - Alargamento do Tubo (modificado Foster & Fell, 2000 <i>apud</i> Fell <i>et. al.</i>, 2005).</u> | 121 |
| <u>Tabela 4.30 – População Atingida, Potencial de Perdas de Vidas e Danos Diretos da Barragem A.</u> | 122 |
| <u>Tabela 4.31 - Ficha Técnica da Barragem B.</u> | 125 |
| <u>Tabela 4.32 - Parâmetros Geomorfológicos da bacia considerada.</u> | 126 |
| <u>Tabela 4.33 - Ponderação do número de curva das bacias de contribuição da barragem B, para condição de umidade antecedente tipo II.</u> | 126 |
| <u>Tabela 4.34 - Condições consideradas no lançamento de rejeitos.</u> | 127 |
| <u>Tabela 4.35 - Curvas cota-volume da barragem B.</u> | 128 |
| <u>Tabela 4.36 - Relação precipitação-duração-frequência.</u> | 130 |
| <u>Tabela 4.37 - Resultados do trânsito de cheia para as durações críticas.</u> | 132 |
| <u>Tabela 4.38 - Resultados do trânsito de cheias no reservatório da barragem B.</u> | 132 |
| <u>Tabela 4.39 – Parâmetros Médios – Barragem B.</u> | 134 |
| <u>Tabela 4.40 - Coeficientes de permeabilidade e Graus de Colmatação do sistema de drenagem interna.</u> | 137 |
| <u>Tabela 4.41 - Variabilidade dos parâmetros geotécnicos.</u> | 140 |
| <u>Tabela 4.42 - Parâmetros utilizados e resultados das análises de estabilidade.</u> | 141 |
| <u>Tabela 4.43 – Média, desvio-padrão e limites inferior e superior considerados.</u> | 151 |
| <u>Tabela 4.44 - Probabilidades de ocorrência de ruptura por instabilização.</u> | 156 |
| <u>Tabela 4.45 - Fatores de Influência na Probabilidade de Iniciação de Erosão Interna-Gradiente Hidráulico.</u> | 160 |
| <u>Tabela 4.46 - Fatores de Influência na Probabilidade de Sufusão em Solos sem Coesão (Foster and Fell, 2000 <i>apud</i> Fell, 2005).</u> | 161 |
| <u>Tabela 4.47 - Fatores de Influência na Probabilidade de Continuação do Processo Erosivo – Existência de Filtro no Ponto de Saída da Percolação.</u> | 162 |
| <u>Tabela 4.48 - Fatores de Influência na Probabilidade de Formação do Tubo - Habilidade em Suportar o Teto (modificado Foster & Fell, 2000 <i>apud</i> Fell <i>et. al.</i>, 2005).</u> | 163 |

| | |
|--|-----|
| <u>Tabela 4.49 - Fatores de Influência na Probabilidade de Progressão do Tubo - Erodibilidade (ao Longo do Fluxo) (modificado Foster & Fell, 2000 apud Fell et. al, 2005).</u> | 164 |
| <u>Tabela 4.50 - Fatores de Influência na Probabilidade de Progressão do Tubo - Limitação do Fluxo (modificado Foster & Fell, 2000 apud Fell et. al, 2005).</u> | 164 |
| <u>Tabela 4.51 - Fatores de Influência na Probabilidade de Incapacidade de Detecção e Intervenção - Efetividade do Ambiente de Controle.</u> | 166 |
| <u>Tabela 4.52 - Fatores de Influência na Probabilidade de Incapacidade de Detecção e Intervenção – Capacidade de Intervenção.</u> | 167 |
| <u>Tabela 4.53 - Fatores de Influência na Probabilidade de Formação de Brecha - Alargamento do Tubo (modificado Foster & Fell, 2000 apud Fell et. al, 2005).</u> | 168 |
| <u>Tabela 4.54 – População Atingida, Potencial de Perdas de Vidas e Danos Diretos da Barragem B.</u> | 168 |
| <u>Tabela 4.55 - Ficha Técnica da Barragem C.</u> | 170 |
| <u>Tabela 4.56 - Parâmetros Geomorfológicos da bacia considerada.</u> | 171 |
| <u>Tabela 4.57 - Valores de CN para cada tipo de solo na bacia de contribuição.</u> | 171 |
| <u>Tabela 4.58 - Curva cota-área-volume de água no reservatório C.</u> | 172 |
| <u>Tabela 4.59 - Curvas cota-volume da barragem C.</u> | 172 |
| <u>Tabela 4.60 - Relação precipitação-duração-frequência.</u> | 175 |
| <u>Tabela 4.61 - Resultados do trânsito de cheias no reservatório da barragem C.</u> | 176 |
| <u>Tabela 4.62 - Curva cota-volume do reservatório da barragem C para borda livre nula.</u> | 177 |
| <u>Tabela 4.63 - Resultados do trânsito de cheia para as durações críticas.</u> | 178 |
| <u>Tabela 4.64 – Parâmetros Médios.</u> | 180 |
| <u>Tabela 4.65 - Variabilidade dos parâmetros geotécnicos.</u> | 185 |
| <u>Tabela 4.66 - Parâmetros utilizados e resultados das análises de estabilidade.</u> | 186 |
| <u>Tabela 4.67 – Média, desvio-padrão e limites inferior e superior considerados.</u> | 201 |
| <u>Tabela 4.68 - Parâmetros utilizados e resultados das análises de estabilidade.</u> | 205 |
| <u>Tabela 4.69 - Probabilidades de ocorrência de ruptura por instabilização.</u> | 208 |
| <u>Tabela 4.70 - Fatores de Influência na Probabilidade de Iniciação de Erosão Interna-Gradiente Hidráulico.</u> | 212 |
| <u>Tabela 4.71 - Fatores de Influência na Probabilidade de Ocorrência de Fluxo Concentrado Associado a um Conduto (modificado de Fell et. al, 2004 apud Fell & Fry, 2007).</u> | 213 |
| <u>Tabela 4.72 - Fatores de Influência na Probabilidade de Continuação do Processo Erosivo – Existência de Filtro no Ponto de Saída da Percolação.</u> | 214 |

| | |
|--|---------------|
| <u>Tabela 4.73 - Fatores de Influência na Probabilidade de Formação do Tubo - Habilidade em Suportar o Teto (modificado Foster & Fell, 2000 apud Fell et. al, 2005).</u> | 215 |
| <u>Tabela 4.74 - Fatores de Influência na Probabilidade de Progressão do Tubo - Erodibilidade (ao Longo do Fluxo) (modificado Foster & Fell, 2000 apud Fell et. al, 2005) – Barragem C.</u> | 215 |
| <u>Tabela 4.75 - Fatores de Influência na Probabilidade de Progressão do Tubo - Limitação do Fluxo (modificado Foster & Fell, 2000 apud Fell et. al, 2005).</u> | 216 |
| <u>Tabela 4.76 - Fatores de Influência na Probabilidade de Incapacidade de Detecção e Intervenção - Efetividade do Ambiente de Controle – Barragem C.</u> | 218 |
| <u>Tabela 4.77 - Fatores de Influência na Probabilidade de Incapacidade de Detecção e Intervenção – Capacidade de Intervenção.</u> | 218 |
| <u>Tabela 4.78 - Fatores de Influência na Probabilidade de Formação de Brecha - Alargamento do Tubo (modificado Foster & Fell, 2000 apud Fell et. al, 2005).</u> | 220 |
| <u>Tabela 4.79 – População Atingida, Potencial de Perdas de Vidas e Danos Diretos da Barragem</u> | <u>C.</u> 220 |
| <u>Tabela 5.1 - Probabilidades de ocorrência dos modos de falha da Barragem A.</u> | 222 |
| <u>Tabela 5.2 - Probabilidades de ocorrência dos modos de falha</u> | 223 |
| <u>Tabela 5.3 - Probabilidades de ocorrência dos modos de falha</u> | 224 |

LISTA DE ABREVIACÕES

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANCOLD - *Australian Committee on Large Dams*
ANM Agência Nacional de Mineração
ART - Anotações de Responsabilidade Técnica
CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos
COPAM - Conselho Estadual de Política Ambiental
CRI - Categoria de Risco
CT - Características Técnicas
Cwa - Classe Climática
DN - Deliberação Normativa
DPA - Dano Potencial Associado
EC - Estado de Conservação
ETA - Análise por Árvore de Eventos
FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente
FMEA - Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos
FTA - Análise por Árvore de Falhas
GS - Peso específico relativo dos sólidos do solo
H - Altura do maciço
IC - Índice de Consistência
ICOLD - *International Commission on Large Dams*
IR - Índice Randômico
ISO - *International Organization for Standardization*
M - metro
n - número de elementos
NBR - Norma Brasileira
PAEBM - Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração
PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens
PS - Plano de Segurança
PSB - Plano de Segurança de Barragem
QF - Quadrilátero Ferrífero

RC - Razão de Consistência

RISR – Relatório de Inspeção de Segurança de Rotina

RPSB - Revisão Periódica de Segurança de Barragem

SNISB - Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens

TR - Tempo de Recorrência

Vr - Volume do Reservatório

ZAS – Zona de Autossalvamento

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| <u>CAPÍTULO 1</u> | 1 |
| <u>1. INTRODUÇÃO</u> | 1 |
| <u>1.1 JUSTIFICATIVAS DA DISSERTAÇÃO</u> | 2 |
| <u>1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO</u> | 3 |
| <u>CAPÍTULO 2</u> | 5 |
| <u>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u> | 5 |
| <u>2.1 CONCEITO DE BARRAGEM</u> | 8 |
| <u>2.2 ALTEAMENTO DE BARRAGEM</u> | 9 |
| <u>2.3 CONCEITO DE RISCO</u> | 11 |
| <u>2.4 GESTÃO DE RISCO</u> | 13 |
| <u>CAPÍTULO 3</u> | 28 |
| <u>3. METODOLOGIA</u> | 28 |
| <u>3.1 PRIMEIRA ETAPA - IDENTIFICAÇÃO DO MODO DE FALHA</u> | 29 |
| <u>3.1.1 GALGAMENTO</u> | 32 |
| <u>3.1.2 EROSÃO INTERNA</u> | 33 |
| <u>3.1.3 INSTABILIDADE</u> | 34 |
| <u>3.1.4 LIQUEFAÇÃO</u> | 36 |
| <u>3.2 SEGUNDA ETAPA - CÁLCULO DA PROBABILIDADE DE RUPTURA</u> | 37 |
| <u>3.2.1 GALGAMENTO</u> | 38 |
| <u>3.2.2 EROSÃO INTERNA</u> | 39 |
| <u>3.2.3 INSTABILIDADE</u> | 44 |
| <u>3.2.4 LIQUEFAÇÃO</u> | 56 |
| <u>3.1. TERCEIRA ETAPA – CONSEQUÊNCIA</u> | 56 |
| <u>3.2. QUARTA ETAPA - CÁLCULO DO RISCO</u> | 58 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.3. | <u>QUINTA ETAPA - AÇÕES QUE REDUZEM O RISCO DE FALHA</u> | 68 |
| 3.4. | <u>SEXTA ETAPA – CLASSIFICAÇÃO DE RISCO SEGUNDO ANM</u> | 70 |
| | <u>CAPÍTULO 4</u> | 77 |
| 4. | <u>ESTUDO DE CASO</u> | 77 |
| 4.1 | <u>BARRAGEM A</u> | 77 |
| 4.1.1 | <u>DESCRIÇÃO DA BARRAGEM</u> | 77 |
| 4.1.2 | <u>CÁLCULO DA PROBABILIDADE DOS MODOS DE FALHAS</u> | 78 |
| | • <u>MODO DE FALHA GALGAMENTO</u> | 78 |
| | • <u>MODO DE FALHA INSTABILIZAÇÃO</u> | 82 |
| | • <u>MODO DE FALHA EROSÃO INTERNA</u> | 102 |
| 4.1.3 | <u>CONSEQUENCIAS</u> | 122 |
| 4.1.4 | <u>CÁLCULO DO RISCO</u> | 122 |
| 4.1.5 | <u>AÇÕES PARA REDUZIR OS RISCOS DE FALHAS</u> | 123 |
| 4.2 | <u>BARRAGEM B</u> | 124 |
| 4.2.1 | <u>DESCRIÇÃO DA BARRAGEM</u> | 124 |
| 4.2.2 | <u>CÁLCULO DA PROBABILIDADE DOS MODOS DE FALHAS</u> | 126 |
| | • <u>MODO DE FALHA GALGAMENTO</u> | 126 |
| | • <u>MODO DE FALHA INSTABILIZAÇÃO</u> | 133 |
| | • <u>MODO DE FALHA EROSÃO INTERNA</u> | 157 |
| 4.2.3 | <u>CONSEQUENCIAS</u> | 168 |
| 4.2.4 | <u>CÁLCULO DO RISCO</u> | 168 |
| 4.2.5 | <u>AÇÕES PARA REDUZIR OS RISCOS DE FALHAS</u> | 169 |
| 4.3 | <u>BARRAGEM C</u> | 169 |
| 4.3.1 | <u>DESCRIÇÃO DA BARRAGEM</u> | 169 |
| 4.3.2 | <u>CÁLCULO DA PROBABILIDADE DOS MODOS DE FALHAS</u> | 170 |
| | • <u>MODO DE FALHA GALGAMENTO</u> | 170 |

| | | |
|---------------------------------|---|-----|
| • | <u>MODO DE FALHA INSTABILIZAÇÃO</u> | 178 |
| • | <u>MODO DE FALHA EROSÃO INTERNA</u> | 209 |
| 4.3.3 | <u>CONSEQUENCIAS</u> | 220 |
| 4.3.4 | <u>CÁLCULO DO RISCO</u> | 220 |
| 4.3.5 | <u>AÇÕES PARA REDUZIR OS RISCOS DE FALHAS</u> | 221 |
| <u>CAPÍTULO 5</u> | | 222 |
| 5. | <u>CONSIDERAÇÕES DOS RESULTADOS</u> | 222 |
| 5.1 | <u>BARRAGEM A</u> | 222 |
| 5.2 | <u>BARRAGEM B</u> | 223 |
| 5.3 | <u>BARRAGEM C</u> | 224 |
| <u>CAPÍTULO 6</u> | | 226 |
| 6. | <u>CONSIDERAÇÕES FINAIS</u> | 226 |
| <u>REFERÊNCIAS</u> | | 228 |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

No processo de beneficiamento de minério (ferro, ouro, nióbio e etc.) são gerados rejeitos, que, muitas vezes, apresentam baixos teores de sólidos, impossibilitando a disposição destes materiais em pilhas. Muitas mineradoras, ainda não investiram em tecnologias que permitem a redução da umidade dos rejeitos, tais como espessadores, filtros prensa ou outras metodologias que permitem alterar as condições de umidade e outras características físicas desses materiais. Portanto, na maioria das mineradoras, os rejeitos oriundos dos beneficiamentos dos minérios são armazenados nos reservatórios de barragens.

Diante deste cenário, o setor minerário implantou numerosas barragens para dispor os rejeitos gerados em suas plantas de beneficiamentos. Para a fiscalização e normatização das barragens de disposição de rejeito de minério e captação de água para o setor minerário, existem algumas leis e portarias. Dentre elas a Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010 e a Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017 da ANM.

A Gestão de Riscos estabelecida por essas legislações refere-se ao Plano de Segurança de Barragens (PSB), preconizando conteúdos mínimos e periodicidades de auditorias, revisões periódicas e outras providências.

O PSB (Plano de Segurança de Barragens) é um instrumento da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), previsto no art. 6º, inciso II, da Lei nº 12.334/2010, de implementação obrigatória pelo empreendedor (de barragem inserida no escopo da lei), cujo objetivo é auxiliá-lo na gestão da segurança. Deve conter dados técnicos da barragem, de construção, operação, manutenção e panorama do estado atual da segurança por meio das inspeções realizadas, devendo, principalmente, servir como uma ferramenta de planejamento de gestão da segurança da barragem.

Em síntese, as barragens de mineração que se enquadram no PSB apresentam altura maior que 15,0 (quinze) metros e/ou capacidade total do reservatório igual a 3.000.000 m³ (três milhões

de metros cúbicos) ou se trata de reservatório que contenha resíduos perigosos. Apresentando uma dessas características, a barragem se enquadra no PSB e passa a ser fiscalizada pela ANM.

A Portaria nº 70.389, da ANM, classifica a barragem quanto ao risco e ao dano potencial. Para a classificação do risco são pontuadas as características físicas da barragem, o estado de conservação e a documentação exigida no plano de segurança. Para a classificação do Dano Potencial, é pontuado o volume do reservatório, a existência de população a jusante, o impacto ambiental e o impacto socioeconômico.

Conforme exposto por Melo (2014), embora as barragens ofereçam benefícios inquestionáveis para a sociedade, impulsionando um desenvolvimento sustentável, seus impactos sobre as áreas vizinhas incluem diversos fatores, entre eles, aspectos relacionados à segurança. Idealmente, toda barragem deveria ser adequadamente planejada, projetada, construída e mantida, mas a observação do grande número de acidentes recentes envolvendo barragens, especialmente estruturas geotécnicas, tem mostrado que esse ideal não tem sido plenamente atendido. Os graves impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes das rupturas têm ensejado uma forte demanda da sociedade em saber seu nível de exposição ao risco perante essas estruturas. De fato, as sociedades estão evoluindo e as suas populações estão se tornando cada vez mais conscientes de que a segurança não é uma condição absoluta, mas sim uma situação tolerável, com baixos níveis de risco residual sempre presentes (ICOLD, 2005). Por isso dá importância em se estabelecer níveis de risco aceitáveis.

O presente trabalho descreve uma proposta de metodologia de gestão de riscos de barragem de mineração com vistas à fiscalização.

Na metodologia, atualmente proposta pela ANM, nota-se que não há um estudo de identificação dos modos de falha, seguidos de estudos probabilísticos e, por fim, de um inventário com o levantamento das consequências baseados em estudo de cenários num hipotético rompimento da barragem. A proposta metodológica desse trabalho visa reduzir a subjetividade na avaliação do risco ao mesmo tempo em que introduz a necessidade de definir níveis de riscos aceitáveis.

JUSTIFICATIVAS DA DISSERTAÇÃO

Atualmente, os órgãos de fiscalização de barragens aplicadas à mineração classificam as barragens baseadas em documentação técnica e dano potencial, de maneira bem sucinta. Não há aplicações probabilísticas para a determinação do risco e a condição de segurança é estabelecida por fatores de segurança nas análises de estabilidade. ICOLD (2005) e Pimenta (2009) apontam que a implementação de atividades de gestão e de análise de risco no Brasil está longe de ser uma prática aplicada em países membros da Comissão Internacional de Grandes Barragens. É inadmissível que a barragem de Brumadinho (MG), cujo rompimento ocorreu em 2019, por exemplo, tenha sido classificada com dano potencial associado ALTO e categoria de risco BAIXO.

Caldeira (2008) aponta que a análise de risco é fundamental para a tomada de decisões, permitindo estabelecer prioridades com vistas ao aumento da segurança estrutural. Hartford e Baecher (2004) apontam que as técnicas de análise de risco melhoram o processo operacional, fornecendo, entre vários benefícios, uma análise ampla e integrada de todos os componentes do sistema da barragem e como eles interagem entre si.

Assim sendo, considera-se de grande atualidade e relevância o tema que busca contribuir para a consolidação da ferramenta no domínio da gestão de risco e segurança de barragens.

De acordo com Hartford e Baecher (2004), os métodos de análises de risco podem ser de natureza qualitativa ou quantitativa. Os métodos de caráter qualitativo se apoiam em formas descritivas ou escalas de ordenação numérica para descrever as grandezas de probabilidade e consequência, enquanto os quantitativos explicitam as incertezas, baseando-se, portanto, em valores numéricos da probabilidade e consequência.

A proposta metodológica desse trabalho visa a reduzir a subjetividade na avaliação do risco ao mesmo tempo em que introduz a necessidade de definir níveis de riscos aceitáveis.

OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho tem por objetivo apresentar uma metodologia de gestão de riscos de barragem de mineração com vistas à fiscalização, menos subjetiva, com estudos dos possíveis modos de falhas, estudos probabilísticos de ocorrência das falhas, metodologias de cálculo de riscos e determinação de riscos aceitáveis, baseado nas boas práticas internacionais.

A partir desses estudos, definiu-se uma classificação baseada nos riscos aceitáveis para uma barragem em diferentes cenários quanto ao dano potencial num eventual rompimento da estrutura.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Brasil possui muitas barragens distribuídas por todo o território nacional, algumas destinadas para acumular água para diversos fins e outras destinadas ao depósito de rejeitos/resíduos de atividades industriais e minerárias. Ao longo dos anos, muitas das áreas situadas a jusante das barragens foram ocupadas por comunidades e, até mesmo, cidades. Com essa ocupação, as áreas a jusante dessas estruturas passaram a caracterizar cenários de risco, uma vez que numa eventual ruptura da barragem a população vulnerável poderá ser atingida, causando grandes consequências.

A lei federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, obriga os proprietários a implantarem um sistema de gestão de segurança em suas barragens, atribuindo a fiscalização ao SISNAMA e às entidades outorgantes do direito de uso dos recursos hídricos para fins de acumulação de água (ANA), dos direitos minerários para disposição de rejeitos (ANM), de autorização de uso do potencial hidráulico para fins de geração hidrelétrica (ANEEL) e às emissoras de licença ambiental para fins de disposição de resíduos industriais.

Cada um dos órgãos fiscalizadores ficou responsável por desenvolver/promulgar legislação específica para desenvolvimento do Cadastro Nacional de Barragens além de dispor sobre o Plano de Segurança, Revisão Periódica de Segurança e Inspeções Regulares e Especiais. Nesse contexto, a ANM editou a Portaria nº 70.389/17, a ANA editou as Resoluções nº 91/12 e nº 742/11 e a ANEEL emitiu Ofício Circular nº 308/12. Conforme estabelecido por estas legislações, os proprietários de barragens têm a responsabilidade de promover as ações necessárias à garantia da segurança de suas barragens, para as fases de construção, operação e desativação, com a realização de monitoramento e manutenção, incluindo a avaliação periódica de segurança e a realização de inspeções de segurança regulares, através de profissionais especializados.

O processo de beneficiamento dos minérios, realizado por muitas mineradoras, gera rejeitos com altos teores de umidades, impedindo assim a disposição destes materiais por meio de pilhas. Diante disso, as mineradoras utilizam as barragens para disposição dos rejeitos. Além

disso, devido as atividades minerárias, que contemplam abertura de acessos, a escavação de taludes com exposição do terreno natural, empilhamento de materiais e outros, há uma grande formação de sedimentos que é também controlada com a implantação de barragens, a fim de depositar os sedimentos provenientes dessas áreas. Essas barragens são fiscalizadas pelo Agência Nacional de Mineração, que utiliza o Plano de Segurança de Barragens como ferramenta de gestão de barragens, do qual são responsáveis pela fiscalização.

Um dos problemas centrais da legislação brasileira vigente sobre segurança de barragens é a definição da categoria de risco e do dano potencial associado à cada barragem de mineração do país, os quais não estão em conformidade com as boas práticas internacionais sobre o tema.

Estudos baseados em dados históricos, como o trabalho de Foster et al. (1998), que utiliza registros históricos para estimar a frequência de falhas em barragens de aterro, demonstram que a probabilidade de ruptura de uma barragem é relativamente baixa. As consequências destes eventos, porém, são normalmente catastróficas. Cabe ressaltar que o aumento dos números de barragens, assim como o crescimento da população, torna cada vez mais próximo o convívio da sociedade com estas estruturas.

Ainda é prática corrente avaliar a segurança de uma barragem geotécnica de modo determinístico, ou seja, por meio de análises de estabilidades realizadas com propriedades médias ou conservadoras. Tais análises fornecem resultados únicos, tomados como definitivos, que são comparados a limites estabelecidos por normas técnicas, englobando apenas um modo de falha, o deslizamento. As legislações vigentes consideram uma estrutura estável ou não estável baseado no fator de segurança obtido nas análises de estabilidade determinísticas, conforme estabelecido na Tabela 0.1.

Tabela 0.1 - Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração (NBR 13028).

| FASE | TIPO DE RUPTURA | TALUDE | FATOR DE SEGURANÇA MÍNIMO |
|---|------------------------|--------------------|----------------------------------|
| Final de construção ^a | Maciço e Fundações | Montante e jusante | 1,3 |
| Operação com rede de fluxo em condição normal de operação, nível máximo do reservatório | Maciço e Fundações | Jusante | 1,5 |
| Operação com rede de fluxo em condição extrema, nível máximo do reservatório | Maciço e Fundações | Jusante | 1,3 |
| Operação com rebaixamento rápido do nível d'água do reservatório | Maciço | Montante | 1,1 |

| | | | |
|---|--------------------|--------------------|-----|
| Operação com rede de fluxo em condição normal | Maciço | Jusante | 1,5 |
| | | Entre bermas | 1,3 |
| Solicitação sísmica com nível máximo do reservatório | Maciço e Fundações | Montante e jusante | 1,1 |
| ^a Etapas sucessivas de barragens alteadas com rejeitos não pode ser analisada como "final de construção", devendo atender a fatores de segurança mínimos estabelecidos para condições de operação. | | | |

Necessita-se que esta prática seja melhorada, uma vez que um resultado determinístico aceito como satisfatório pode estar associado a uma probabilidade de ruptura considerada como alta. Ressalta-se que a variabilidade de parâmetros no aterro da barragem, pode inviabilizar o tratamento determinístico nas análises de estabilidade. A engenharia geotécnica lida com materiais que naturalmente apresentam variabilidade de suas propriedades e, conseqüentemente, os resultados de análises também são variáveis. Quanto maior a variabilidade dos parâmetros de entrada, maior será a dispersão dos possíveis resultados de cálculo e, portanto, maior será a probabilidade de ocorrência de uma possível falha. Mais importante ainda, é explanar que somente um modo de falha é considerado na legislação, a estabilidade quanto ao escorregamento, não sendo considerado metodologia para modo de falha piping.

Quanto ao galgamento, a NBR 13028 estabelece que as dimensões dos sistemas extravasores devem ser definidas a partir do estudo de vazões máximas, que consiste em definir a vazão de cheia para determinado período de retorno (TR), a ser utilizado no dimensionamento hidrológico-hidráulico destas estruturas, garantindo a segurança dos sistemas decorrente de eventos extremos de cheia. O período de retorno deve ser definido a partir das conseqüências de falha estrutural e obedecendo à fase da vida útil da estrutura (fase operacional ou de fechamento) e após a vida útil (Tabela 0.3).

Para barragens alteadas à montante, cujo maciço encontra-se apoiado no rejeito, deve ser verificado a susceptibilidade do rejeito ao fenômeno de liquefação. Para este tipo de falha, a Resolução 13 da ANM propôs a seguinte condicionante:

“Art. 5º Cabe ao auditor, profissional legalmente habilitado pelo CONFEA/CREA, calcular os fatores de segurança para as barragens de mineração inseridas na PNSB, independentemente do método construtivo adotado, com base na ABNT NBR 13.028/2017, nas normas internacionais e nas boas práticas de engenharia, sendo exigido, para as

análises de estabilidade e estudos de susceptibilidade à liquefação na condição não drenada, valor igual ou superior a 1,3 para resistência de pico”.

Por sua vez, a probabilidade de ruptura, independentemente do modo de falha, também não pode ser avaliada isoladamente, sem estar associada às suas consequências. Uma estrutura com probabilidade de falha alta, executada em local isolado, intuitivamente apresenta menor criticidade que uma estrutura com probabilidade de falha reduzida, executada em local de elevada densidade populacional.

A gestão de risco aplicadas às barragens visa mitigar eventuais catástrofes, apresentando um indicativo da gravidade de cada cenário, favorecendo a emissão de sinais antecipados de alerta, com a respectiva remoção de pessoas das áreas de risco. Pode ainda apresentar uma diretriz, por meio da realização de análises comparativas, para a escolha das melhores ações de resposta a serem adotadas para evitar o agravamento de uma situação crítica.

Podem ainda apresentar uma diretriz, por meio da realização de análises comparativas, para a escolha das melhores ações de resposta a serem adotadas para evitar o agravamento de uma situação crítica.

CONCEITO DE BARRAGEM

A construção de barragens é uma das atividades técnicas mais antigas executadas em benefício das civilizações. Barragens construídas com solos e rochas são conhecidas desde o terceiro milênio antes de Cristo (KUTZNER, 1997).

A barragem mais antiga registrada no mundo é a de Jawa, na Jordânia, um aterro de solo e muros de alvenaria, com 5 m de altura e 80 m de comprimento, datado em torno de 3.000 AC. Outra estrutura bem conhecida e que remete à mesma época é a barragem de Sadd el Kafara, localizada no Egito, de aproximadamente 2.650 AC. (FAHLBUSCH, 2009).

A seguir apresentam-se algumas definições de barragem, conforme diversos órgãos nacionais.

Conforme preconizado na Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Barragem é qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação

de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas;

De acordo com a NBR 13028, barragens de mineração podem ser definidas como: barragens, barramentos, diques, reservatórios, cavas exauridas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, utilizados para fins de contenção, acumulação ou decantação de rejeito de mineração ou descarga de sedimentos provenientes de atividades em mineração, com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas (ABNT NBR 13028:2017).

De acordo com a ANM, barragens de mineração podem ser definidas como: barragens, barramentos, diques, cavas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, construídos em cota superior à da topografia original do terreno, utilizados em caráter temporário ou definitivo para fins de contenção, acumulação, decantação ou descarga de rejeitos de mineração ou de sedimentos provenientes de atividades de mineração com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas, excluindo-se deste conceito as barragens de contenção de resíduos industriais.

Por fim, de acordo com o Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, elaborada pela Agência Nacional de Águas (ANA), as barragens, compreendendo o barramento, as estruturas associadas e o reservatório, são obras necessárias para uma adequada gestão dos recursos hídricos e contenção de rejeitos de mineração ou de resíduos industriais. Sua construção e operação podem, no entanto, envolver danos potenciais para as populações e os bens materiais e ambientais existentes no entorno.

ALTEAMENTO DE BARRAGEM

De acordo com a NBR 13028, alteamento de barragens são quaisquer incrementos de altura do maciço de barragens, a partir de um maciço inicial existente, projetados e construídos para aumento de capacidade volumétrica, elevação de lâmina de água, aumento de altura de amortecimento de cheias, ou outro motivo, tornando necessário ou desejável tal procedimento. Alteamento da barragem a partir do eixo do maciço inicial existente, podendo ser projetado e

construído por meio de três formas: métodos de alteamento a jusante, linha de centro e montante.

No método de alteamento a jusante, o material de construção é disposto a jusante do maciço inicial da barragem. No método de alteamento de linha de centro, os materiais de construção são dispostos parte a jusante e parte a montante do dique inicial e, finalmente, no método de alteamento a montante, o material de construção é disposto a montante de um dique inicial. O método de alteamento a montante envolve uma atenção especial nas fases de projeto, construção, operação e desativação, e sua escolha deve ser pautada por um maior nível de detalhamento na engenharia dos rejeitos, sejam eles utilizados como fundação ou como material de construção, bem como nos elementos de drenagem interna e análise para solicitações de carregamento não drenado. Para este método, o manual de operação deve ser incluído no projeto e deve ser detalhado para evitar erros de operação. (NBR, 13028).

A Resolução nº 13 (ANM), entende que:

"I - método "a montante": a metodologia construtiva de barragens onde os maciços de alteamento, se apoiam sobre o próprio rejeito ou sedimento previamente lançado e depositado, estando também enquadrados nessa categoria os maciços formados sobre rejeitos de reservatórios já implantados;

II - método "a jusante": consiste no alteamento para jusante a partir do dique inicial, onde os maciços de alteamento são construídos com material de empréstimo ou com o próprio rejeito;

III – método: "linha de centro": método em que os alteamentos se dão de tal forma que o eixo da barragem se mantém alinhado com o eixo do dique de partida, em razão da disposição do material construtivo parte a jusante e parte a montante em relação à crista da etapa anterior;

A resolução supracitada, não vinculou o método de montante somente a implantação do alteamento em relação ao eixo da barragem, mas sobre qual material que o mesmo está implantado. Sendo considerado todos os maciços implantados sobre o rejeito como método à montante.

A resolução supracitada não vinculou o método de montante somente à implantação do alteamento em relação ao eixo da barragem, mas sobre qual material o mesmo está implantado. Sendo considerado todos os maciços implantados sobre o rejeito como método a montante.

Esta resolução foi publicada em 8 de agosto de 2019, após o rompimento da barragem da Mina de Feijão, de propriedade da Vale, localizada em Brumadinho, Minas Gerais e visou proibir a implantação de novas barragens implantadas sob o rejeito (método “a montante”) e obrigar a descaracterização das barragens “a montante” existentes, estabelecendo medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido e dá outras providências.

CONCEITO DE RISCO

De acordo com a NBR ISO 31000:2009, risco é efeito da incerteza nos objetivos.

- *“NOTA 1 - Um efeito é um desvio em relação ao esperado - positivo e/ou negativo.*
- *NOTA 2 - Os objetivos podem ter diferentes aspectos (tais como metas financeiras, de saúde e segurança e ambientais) e podem aplicar-se em diferentes níveis (tais como estratégico, em toda a organização, de projeto, de produto e de processo).*
- *NOTA 3 - O risco é muitas vezes caracterizado pela referência aos eventos potenciais e às consequências, ou uma combinação destes.*
- *NOTA 4 - O risco é muitas vezes expresso em termos de uma combinação de consequências de um evento (incluindo mudanças nas circunstâncias) e a probabilidade de ocorrência associada.*
- *NOTA 5 - A incerteza é o estado, mesmo que parcial, da deficiência das informações relacionadas a um evento, sua compreensão, conhecimento, sua consequência ou sua probabilidade”.*

O risco é estimado pelo produto da probabilidade de ocorrência de um evento adverso e das suas consequências, ou, alternativamente, pela conjugação de todos os conjuntos de três elementos, constituídos pelo cenário, pela probabilidade de ocorrência desse evento e pelas consequências associadas (ICOLD, 1998). Posteriormente, o risco foi definido como a chance de algo acontecer, e é o produto da probabilidade com a consequência (ICOLD, 2011). De acordo com a CETESB (2011), risco é a medida de danos à vida humana, resultante da combinação entre frequência de ocorrência de um ou mais cenários acidentais e a magnitude dos efeitos físicos associados a esses cenários.

Evento é definido como um fato já ocorrido, no qual não foram registradas consequências sociais, econômicas e ambientais relacionadas diretamente a ele. Acidente é um evento no qual foram registradas consequências sociais, econômicas e ambientais (perdas e danos).

Conforme explanado por Caldeira (2008), por definição, risco é o valor obtido a partir da consideração das consequências possíveis de acontecimentos indesejáveis conjugada com a probabilidade de ocorrência dos fatores intervenientes no processo. Trata-se da combinação da probabilidade da ocorrência de cenários desfavoráveis com as suas consequências verosímeis. Envolve a consideração de, pelo menos, três elementos: o cenário, a probabilidade de ocorrência e a consequência associada.

O risco de um empreendimento para a comunidade e para o meio ambiente, circunvizinhos e externos aos limites do empreendimento, está diretamente associado à possibilidade de ocorrer uma falha e à vulnerabilidade da região onde está ou será localizado (CETESB, 2011) (Figura 0.1).

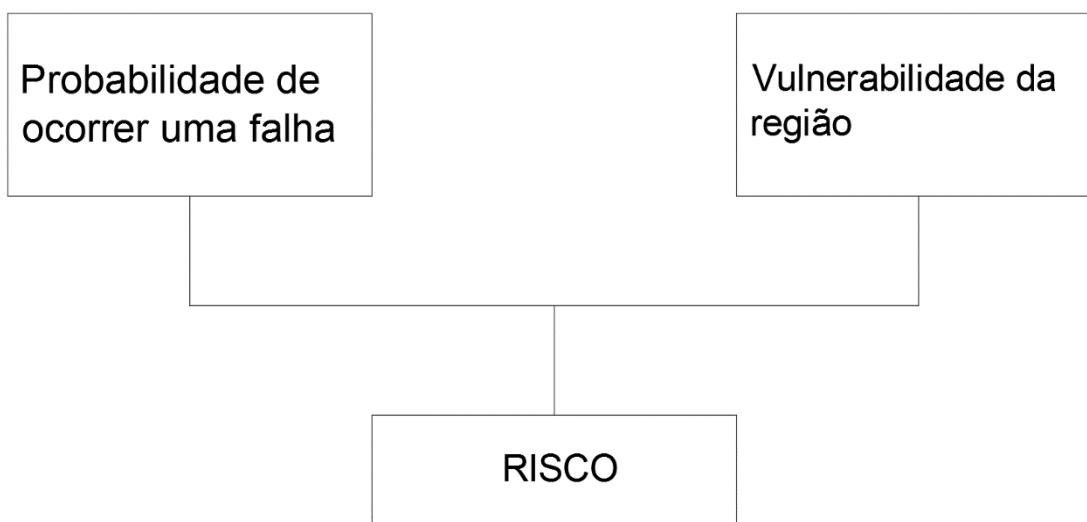


Figura 0.1 – Conceito de Risco (CETESB, 2011).

De maneira geral, risco é o valor obtido do produto das consequências possíveis de acontecimentos indesejáveis com a probabilidade de ocorrência de evento adverso.

De acordo com Augusto Filho (2001), a análise quantitativa de risco depende da obtenção e ponderação de dois parâmetros: a frequência ou probabilidade de um determinado fenômeno ocorrer, e a magnitude das consequências socioeconômicas associadas a eles.

Nas análises qualitativas, o grau de risco é estabelecido por termos linguísticos (baixo, médio e alto) e as consequências podem ser definidas de forma similar, englobando intervalos de valores relacionados ao número de moradias expostas ao risco (ROQUE, 2013). “Uma vez o risco avaliado o dono da obra assumirá responsabilidades acrescidas, do que, conscientemente, aceitou o risco, não podendo alegar a sua ignorância, se ocorrer algum acontecimento desfavorável” (Eurocódigo7–ProjetoGeotécnico,2004). Quanto maior for o risco que o dono da obra estiver disposto a correr menor, será o custo inicial de construção e vice-versa (Caldeira, 2005).

GESTÃO DE RISCO

Barragens são estruturas que podem apresentar falha e essa falha pode ocasionar consequência, sendo, portanto, classificadas como uma estrutura de risco. Diante do exposto, é necessário realizar a gestão de risco, visando minimizar os impactos que uma eventual ruptura possa

ocasionar. Hartford e Baecher (2004) também defendem o uso do processo de gestão baseado no risco como uma melhoria na prática tradicional da gestão da segurança de barragens, na qual os três componentes fundamentais - monitoramento, revisões periódicas de segurança e procedimentos de manutenção e operação - são as atividades centrais do processo. Em síntese, a gestão de risco consiste em realizar a análise de risco e verificar quais as ações para mitigar o risco.

Dentre os principais benefícios do processo de gestão de risco destacam-se:

- Conhecer as características da estrutura e suas principais informações;
- Identificar os modos de falha;
- Calcular a probabilidade de ocorrência de cada modo de falha;
- Caracterização das áreas atingida, num hipotético rompimento da barragem;
- Calcular o risco;
- Verificar se o risco está abaixo do risco aceitável;
- Ações para controlar o risco, atingindo níveis aceitáveis

Kreuzer (2000) esboça na Figura 0.2, as atividades fundamentais de gestão de risco.

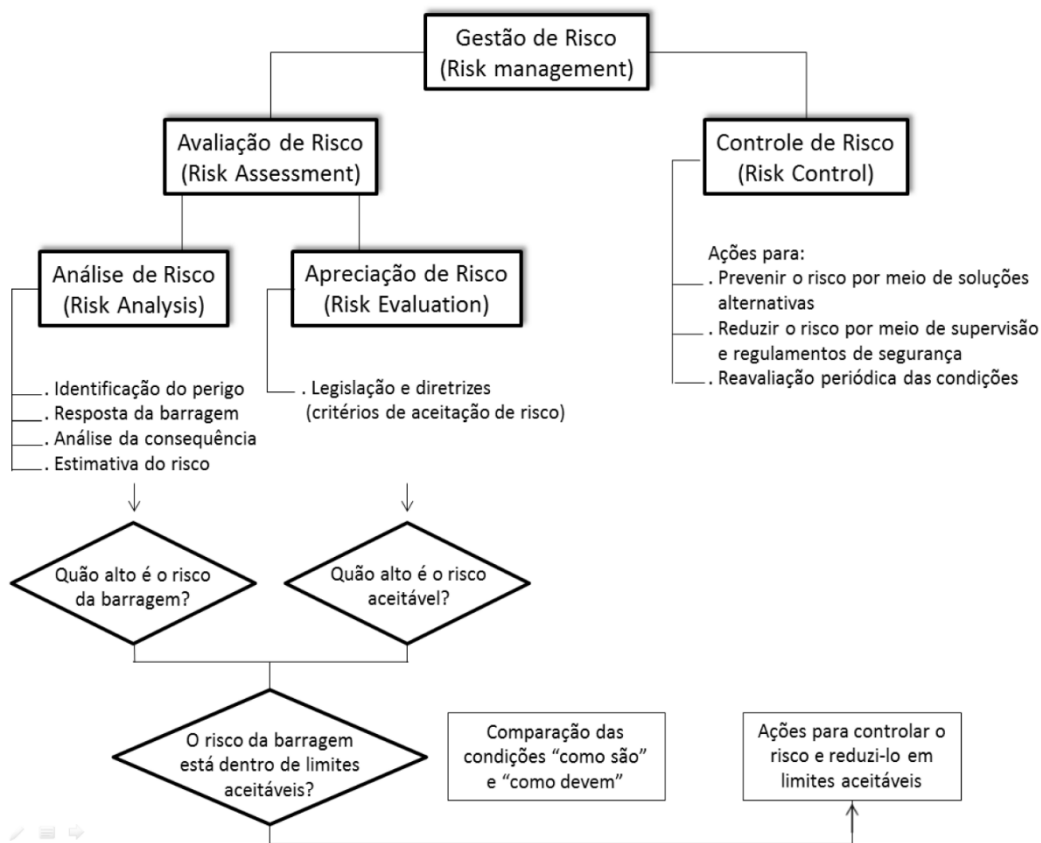


Figura 0.2 - Atividades fundamentais da gestão de risco

Fonte: Adaptado de KREUZER, 2000, p. 782.

Análise de Riscos é o conjunto de procedimentos que visam a identificação de acontecimentos indesejáveis, que conduzem à materialização dos riscos, assim como a análise dos mecanismos que desencadeiam esses acontecimentos e a determinação das respostas das estruturas e das respectivas consequências (Caldeira,2005). A análise de risco consiste em identificar os modos de falha, calcular a probabilidade de ocorrência das possíveis falhas, analisar a consequência e estimar o risco.

A atividade de avaliação de risco incorpora o processo total de análise e apreciação de risco. De modo mais amplo, é definido como sendo o processo de tomada de decisão se os riscos existentes são toleráveis e as atuais medidas de controle são adequadas, e, em caso negativo, se as medidas alternativas de controle do risco são justificadas ou serão implementadas (ANCOLD, 2003; CNPGB, 2005; ICOLD, 2005).

A análise de risco deve refletir a realidade do empreendimento no tocante às suas características locais, às condições operacionais e de manutenção e aos sistemas de proteção disponíveis. Para tanto, o levantamento e a descrição do empreendimento e do seu entorno – etapa que inicia o estudo – devem ser fiéis ao momento em que este é realizado. As simulações dos efeitos físicos e a estimativa das frequências das hipóteses e dos cenários acidentais devem ser consistentes com a etapa inicial, com destaque para os limites operacionais de equipamentos, que, em geral, funcionam como condições de contorno para as simulações.

A Figura 0.3 apresenta o fluxograma de gestão de risco.

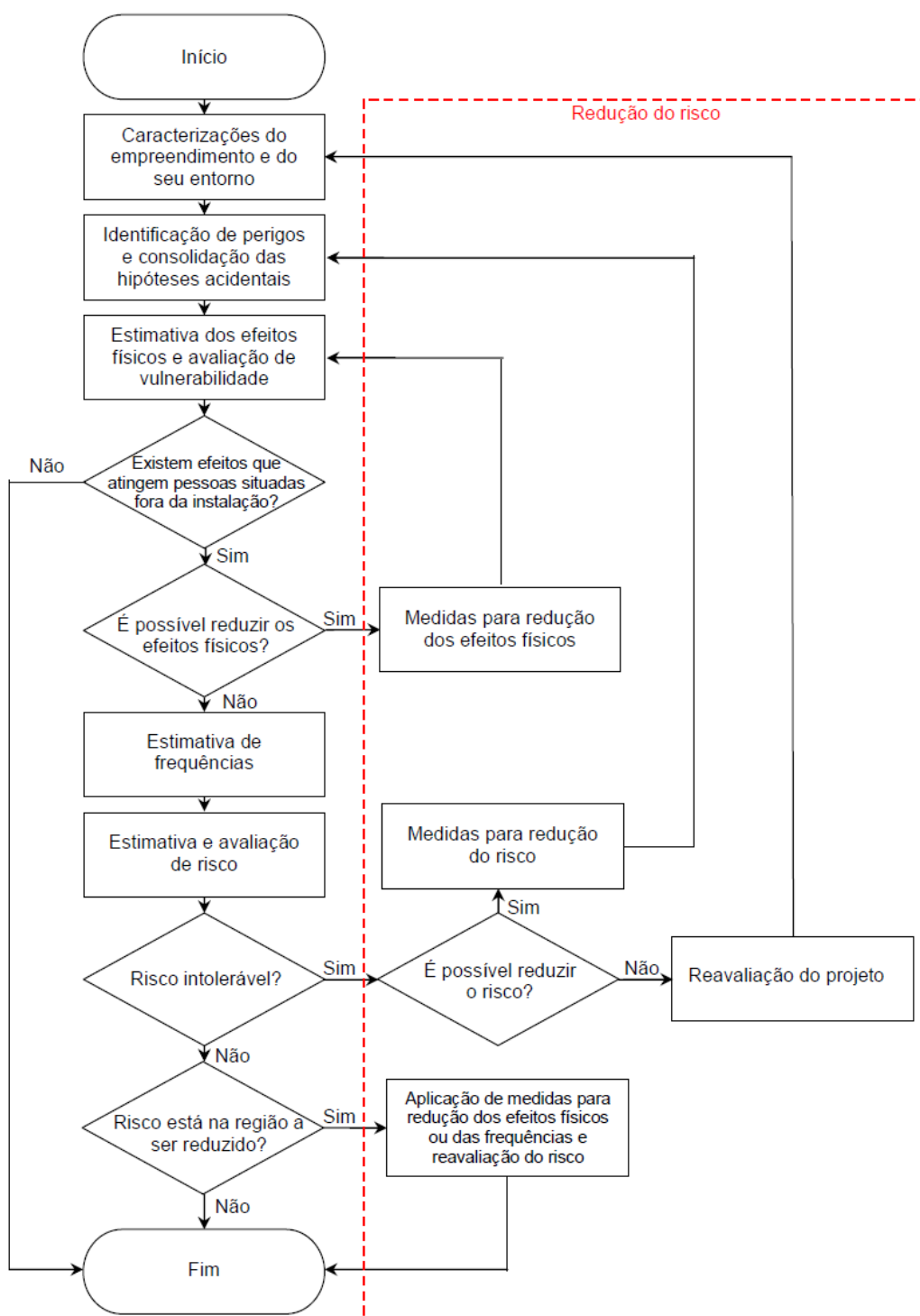


Figura 0.3 – Fluxograma proposto pela CETESB (2011).

Principais informações que devem constar na análise de risco:

- Caracterização da estrutura
- Nome da Estrutura:

- Elevação da Crista;
 - Método de alteamento;
 - Possui sistema extravasor?
 - Elevação da soleira do vertedouro;
 - Material que constitui a estrutura:
 - Possui sistema de drenagem interna?
 - Volume do reservatório;
 - Material do reservatório Inerte ou Não Inerte;
 - Possui instrumentação suficiente para o monitoramento da estrutura?
 - Instrumentação já atingiu limite dos níveis de segurança?
 - Qual o estado de conservação da estrutura? Apresenta anomalias?
 - Existe projeto As Built ou As Is?
 - As informações existentes são suficientes para elaborar as análises geológicas, geotécnica e hidráulicas?
 - Toda a descrição deve ser acompanhada de material de referência pertinente como relatórios, plantas, gráficos de instrumentação, entre outros, com o qual seja possível evidenciar as informações.
- **Identificação do empreendimento:**
 - Nome, Logradouro, Bairro, Município, CEP
 - Contato:
 - Classificação ANM:
 - Classificação COPAM:
 - Observações:
 - **Identificação do empreendedor**

- Nome do Empreendedor e CNPJ
- Responsáveis Técnicos: Nomes e CPF's
- Contatos:
- Observações:

- Segurança
 - Relacionar as normas que orientam aspectos de segurança do empreendimento, como as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), as regulamentadoras da ANM e outras
 - Apresentar os fatores de segurança admissíveis e se a estrutura atende ou não;

- Caracterização do entorno
 - Descrever o entorno do empreendimento de maneira completa e detalhada. Na elaboração da Análise de Risco, definindo a região denominada de Zona de Alto Salvamento, sendo esta a região do vale à jusante da barragem em que se considera que os avisos de alerta à população são da responsabilidade do empreendedor, por não haver tempo suficiente para uma intervenção das autoridades competentes em situações de emergência, devendo-se adotar a maior das seguintes distâncias para a sua delimitação: a distância que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a trinta minutos ou 10 km.
 - Nas áreas, onde houver ocupação humana, é necessário haver um planejamento para a realização de uma evacuação emergencial da área visando à preservação da vida humana. Esse planejamento deve ser feito por meio de um Plano de Contingência Municipal.
 - Identificar e cadastrar a população vulnerável, pessoas residente ou instalada temporariamente dentro da área de impacto direto. Alternativamente, a caracterização pode ser feita com base em dados dos Setores Censitários do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

- Apresentar descrição em forma de quadro indicando todas as atividades presentes no local, como, por exemplo, comércios, indústrias, entre outros, com enfoque para os locais onde pode haver aglomeração de pessoas, tais como residências, creches, escolas, asilos, presídios, ambulatórios, casas de saúde, hospitais e afins. No caso de população flutuante em ruas, avenidas, estradas, entre outras, estimar o número de pessoas presentes no local.
 - Identificar os bens ambientais relevantes, tais como sistemas hídricos utilizados para abastecimento público, áreas de preservação ambiental, entre outros.
 - Identificar as atividades presentes no local (acima mencionadas) em foto aérea atualizada, com escala e resolução adequadas, que permita a visualização do entorno, e devem ser complementadas com levantamento em campo.
- Identificação de perigos

Consiste na aplicação de técnicas estruturadas para a identificação das possíveis sequências de eventos, visando a obtenção de diagnóstico do local e a definição de hipóteses acidentais.

- Estimativa de frequências

Nos casos em que os efeitos físicos extrapolam os limites do empreendimento e podem afetar pessoas, o risco do empreendimento deve ser calculado; para tanto, deve-se estimar as frequências de ocorrência de hipóteses e de cenários acidentais.

- Estimativa e apreciação de risco

As estimativas de risco podem ser de natureza qualitativa ou quantitativa. As análises qualitativas se utilizam de uma forma descritiva ou pontuação numérica para apresentar a magnitude de consequências potenciais e sua probabilidade da ocorrência. Já as análises

quantitativas são baseadas em valores numéricos das consequências potenciais e suas probabilidades, assumindo-se que tais valores sejam uma representação válida da magnitude real das consequências e da probabilidade dos vários cenários estudados.

As qualitativas tendem a ser subjetivas, já as quantitativas ainda se apresentam de aplicação restrita na área de barragens em virtude da dificuldade na caracterização analítica das incertezas envolvidas no processo. Por isso, Pardo (2009) enfatiza que, na engenharia geotécnica, nenhuma das duas abordagens pode ser considerada totalmente adequada, pois não conseguem modelar a realidade por completo.

Segundo Pimenta (2009) o controle de risco encerra um conjunto de atividades integradas contemplando ações de decisão, mitigação, prevenção, detecção, planos de emergência, revisão e comunicação de riscos. AS/NZS (1999) e ICOLD (2005) citam que, da perspectiva do gerenciamento e negócio, as opções de controle de risco podem ser agrupadas nas seguintes categorias:

- Diminuir probabilidade de ocorrência da falha, investindo na segurança das estruturas;
 - Mitigar as consequências;
 - Reduzir o risco;
 - Controlar o Risco
-
- Controle de Risco

Uma situação emergencial em barragens pode ter duas fases, sendo a primeira uma fase interna, quando ações são realizadas no âmbito das responsabilidades do empreendedor, em que o foco principal são as condições de operação, segurança e estabilidade. A segunda fase é externa, quando procedimentos emergenciais devem ser adotados pela população em risco e pelo poder público local.

Os procedimentos da primeira fase são estabelecidos no PAEBM (Plano de Ação de Emergência para Barragem de Mineração), documento técnico e de fácil entendimento elaborado pelo empreendedor, no qual estão identificadas as situações de emergência em

potencial da barragem, estabelecidas as ações a serem executadas nesses casos e definidos os agentes a serem notificados, com o objetivo de minimizar danos e perdas de vida. A fase externa contém ações típicas de Proteção e Defesa Civil, e seu planejamento deve estar estabelecido em Planos de Contingência Municipais.

Portanto para o controle do Risco, tem-se que:

- Elaborar o PAEBM
- Elaborar o Plano de Contingência, considerando um hipotético rompimento de barragens, definindo:
 - Rota de Fuga, caminho pré-definido a ser percorrido pela população após o acionamento de um sistema de alarme numa emergência, visando se deslocar para um Ponto de Encontro.
 - Ponto de Encontro: Local seguro, previamente estabelecido, para o qual deverá se deslocar uma população após o acionamento de um sistema de alarmes numa emergência;
- Elaborar o projeto de monitoramento e sinalização de alerta;
- Apresentar os materiais e recursos disponíveis para atender a população vulnerável presente na ZAS.

A finalidade principal do Plano de Contingência é mitigar os danos humanos num cenário de desastres. Trata-se de um planejamento para que o maior número possível de pessoas que habitam uma determinada área susceptível a ocorrência de um desastre possa ser alertada em tempo hábil e saberem o que fazer para se salvar. Adicionalmente devem estar planejadas as ações do poder público que visem ao socorro e ao acolhimento adequado dessa população.

Para a elaboração do Plano de Contingência é necessário o conhecimento dos elementos básicos além do planejamento de ações que deverão ser executadas durante uma emergência.

Os elementos básicos necessários à elaboração da estrutura principal do Plano são:

- Identificação do cenário de risco;
- Identificação da área de impacto potencial;
- Identificação da população vulnerável;
- Definição do sistema de monitoramento e alerta;
- Definição de um sistema de alarme;
- Estabelecimento de rotas de fuga e de pontos de encontro;
- Plano de Comunicação a autoridades e serviços de emergência.
- Definição e dimensionamento dos meios de transporte e das rotas para resgate da população nos pontos de encontro;
- Definição e dimensionamento dos locais de abrigo, atendimento médico-hospitalar e psicológico;
- Definição do plano de acionamento de autoridades e serviços de emergência municipais e/ou estaduais;

- Definição de responsáveis por cada fase do Plano, com a identificação clara dos recursos disponíveis, instituições envolvidas bem como de seus representantes.
- Realização de Simulados

As legislações vigentes abordam alguns aspectos relacionados aos Planos de Contingência. De modo geral, há citações em duas leis, a 12.608/2012 e 12.340/2010 (alterada pela lei 12.983/2014). A seguir, apresenta-se, de forma sucinta, a legislação com o tema de Planos de Contingência:

Lei 12.608/2012

A lei 12.608/2012 instituiu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil e dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil – SIMPDEC e sobre o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil – CONPDEC, dentre outras providências. Um importante aspecto a ser destacado dessa lei, é o conjunto de competências dos entes federativos quanto ao tema de prevenção de desastres. Dentre essas, destacam-se algumas que de forma direta ou indireta guardam relação o as atividades atinentes aos Planos de Contingência:

“Art. 8º Compete aos Municípios:

VIII - organizar e administrar abrigos provisórios para assistência à população em situação de desastre, em condições adequadas de higiene e segurança;

IX - manter a população informada sobre áreas de risco e ocorrência de eventos extremos, bem como sobre protocolos de prevenção e alerta e sobre as ações emergenciais em circunstâncias de desastres;

XI - realizar regularmente exercícios simulados, conforme Plano de Contingência de Proteção e Defesa Civil;

XII - promover a coleta, a distribuição e o controle de suprimentos em situações de desastre;

XVI - prover solução de moradia temporária às famílias atingidas por desastres.

Art. 7o Compete aos Estados:

VIII - apoiar, sempre que necessário, os Municípios no levantamento das áreas de risco, na elaboração dos Planos de Contingência de Proteção e Defesa Civil e na divulgação de protocolos de prevenção e alerta e de ações emergenciais.

Art. 6o Compete à União:

IV - apoiar os Estados, o Distrito Federal e os Municípios no mapeamento das áreas de risco, nos estudos de identificação de ameaças, suscetibilidades, vulnerabilidades e risco de desastre e nas demais ações de prevenção, mitigação, preparação, resposta”.

Lei 12.340/2010

Dispõe sobre o Sistema Nacional de Defesa Civil – SINDEC e sobre as transferências de recursos para ações de socorro, assistência às vítimas, restabelecimento de serviços essenciais e reconstrução nas áreas atingidas por desastre, sobre o Fundo Especial para Calamidades Públicas, dentre outras providências.

Dessa lei, podem-se extrair conceitos relacionados à elaboração e ao conteúdo mínimo para os Planos de Contingência.

“Art. 3º-A - § 6º O Plano de Contingência de Proteção e Defesa Civil será elaborado no prazo de 1 (um) ano, sendo submetido a avaliação e prestação de contas anual, por meio de audiência pública, com ampla divulgação. (Incluído pela Lei nº 12.608, de 2012).

Art. 3º-A - § 7º São elementos a serem considerados no Plano de Contingência de Proteção e Defesa Civil, a ser elaborado pelo Município: (Incluído pela Lei nº 12.983, de 2014).

I - indicação das responsabilidades de cada órgão na gestão de desastres, especialmente quanto às ações de preparação, resposta e recuperação; (Incluído pela Lei nº 12.983, de 2014).

II - definição dos sistemas de alerta a desastres, em articulação com o sistema de monitoramento, com especial atenção dos radioamadores; (Incluído pela Lei nº 12.983, de 2014).

III - organização dos exercícios simulados, a serem realizados com a participação da população; (Incluído pela Lei nº 12.983, de 2014).

IV - organização do sistema de atendimento emergencial à população, incluindo-se a localização das rotas de deslocamento e dos pontos seguros no momento do desastre, bem como dos pontos de abrigo após a ocorrência de desastre; (Incluído pela Lei nº 12.983, de 2014).

V - definição das ações de atendimento médico-hospitalar e psicológico aos atingidos por desastre; (Incluído pela Lei nº 12.983, de 2014).

VI - cadastramento das equipes técnicas e de voluntários para atuarem em circunstâncias de desastres; (Incluído pela Lei nº 12.983, de 2014).

VII - localização dos centros de recebimento e organização da estratégia de distribuição de doações e suprimentos.

Art. 3º-B. Verificada a existência de ocupações em áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos, o município adotará as providências para redução do risco, dentre as quais, a execução de plano de contingência e de obras de segurança e, quando necessário, a remoção de edificações e o reassentamento dos ocupantes em local seguro.”

Nota-se que são ações dos empreendedores, proprietários das estruturas, buscando reduzir a probabilidade, investindo na segurança da estrutura, realizando monitoramentos, auditorias, cuidado do estado de conservação e realizando ações de melhoras na estrutura.

Uma vez o risco avaliado o dono da obra assumirá responsabilidades acrescidas, dado que, conscientemente, aceitou o risco, não podendo alegar a sua ignorância, se ocorrer algum acontecimento desfavorável (Eurocódigo7–ProjetoGeotécnico,2004)

Quanto maior for o risco que o dono da obra estiver disposto a correr menor será o custo inicial de construção e vice-versa (Caldeira, 2005).

Por fim, a gestão de risco aplicada às barragens é uma ferramenta de tomada de decisão para os empreendedores e órgãos fiscalizadores.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Na metodologia, atualmente proposta pela ANM, nota-se que não há um estudo de identificação dos modos de falha, seguido de análises determinísticas e estudos probabilísticos e, por fim, de um inventário com o levantamento das consequências baseados em estudo de cenários num hipotético rompimento da barragem.

Diante do exposto, a proposta metodológica desse trabalho visa reduzir a subjetividade na avaliação do risco, ao mesmo tempo em que introduz a necessidade de definir níveis de riscos aceitáveis. Será apresentada metodologia para mensurar o risco aceitável, classificar a barragem de acordo com o risco aceitável e indicar um plano de ação de acordo com a classificação.

Serão apresentados 03 estudos de casos, de barragens hipotéticas. O desenvolvimento da análise de risco é realizado em cinco etapas sequenciais: identificação dos modos de falhas, cálculo da probabilidade de ruptura, mensuração das consequências e cálculo e análise do risco.

Os modos de falhas têm que ser estudados com particularidades, identificando o método construtivo da barragem, tipo de fundação, falhas na implantação, existência de drenagem interna, ausência de informações, e outros. A partir dos modos de falhas definidos, devem ser realizadas análises probabilísticas por diversas metodologias existentes. Após esta etapa, cenários de rupturas hipotéticas (dam break) deverão ser simulados, baseados no modo de falha que apresenta a maior probabilidade de ocorrer. Com a definição da mancha de inundação, deverão ser realizados inventários com o levantamento das consequências. Por fim, tem-se uma medida do risco que se compara com o risco aceitável, baseado nos estudos e aplicados pelas legislações internacionais.

A seguir serão apresentadas as etapas de classificação do risco de barragens propostas nessa dissertação

PRIMEIRA ETAPA - IDENTIFICAÇÃO DO MODO DE FALHA

A falha de um barramento pode ser definida como a perda da sua função principal, ou seja, a perda da capacidade de reservar, de se obter um reservatório. Assim, um modo de falha potencial de um barramento é a liberação sem controle do material contido no reservatório para jusante.

No caso geral, falha ou ruptura de uma barragem é a incapacidade de executar funções tais como o abastecimento de água, prevenção de percolação excessiva ou contenção de substâncias. No contexto da segurança da barragem, a falha é geralmente confinada a aspectos de integridade estrutural, e, em alguns casos, inclui o caso especial da liberação descontrolada do conteúdo de um reservatório por meio do colapso total ou parcial da barragem.

Em barragens de mineração as causas geradoras de acidentes podem agrupar-se em ações extremas (chuvas intensas e sismos), anomalias nos procedimentos operacionais (intervenções e erros humanos) e deficiência de projetos ou de implantação (ausência ou subdimensionamento de sistema de drenagem interna, ausência ou subdimensionamento do sistema extravasor, ausência de tratamento de fundação, aterro implantado sem controle etc.).

A identificação dos modos potenciais de falha (ruptura) de uma barragem de terra e enrocamento converge nas categorias gerais listadas por Lafitte (1993, citado por Hartford e Baecher, 2004):

- *“Falhas hidráulicas devido a níveis excepcionais: inclui, por exemplo, galgamento e subsequente erosão externa devido a vertedouro com capacidade de descarga insuficiente, ou até mesmo associado a danos em comportas ou erros de operação.*
- *Movimentos de massa devido a carregamentos excepcionais, propriedades inadequadas dos materiais, ou singularidades geológicas não detectadas: inclui, por exemplo, instabilidade de taludes (por equilíbrio limite), deformações que conduzem a galgamento, liquefação de solos, instabilidades de fundação ou ombreiras, rebaixamento rápido associado a escorregamento do talude de montante e deslizamentos de encostas para o interior do reservatório que acarretem galgamento.*

- *Erosão interna: inclui, entre outros, desenvolvimento de piping no núcleo da barragem e erosão de solos de fundação ou juntas (preenchimento de descontinuidades).*
- *Liquefação: ruptura ocorrida em maciços apoiados ou constituídos por materiais susceptíveis ao fenômeno de liquefação. A liquefação pode ser basicamente entendida como sendo uma ação de levar qualquer substância de seu estado natural ao estado fluido e, no caso dos solos, do estado sólido para o estado liquefeito. Para tal, impõe-se um acréscimo da poropressão concomitante com a redução das tensões efetivas. Esta transformação decorre da brusca aplicação de uma determinada carga, que pode ter origem estática ou dinâmica.”*

Deve-se pesquisar todos os mecanismos de falha dos componentes que podem levar à ruptura do barramento com a liberação sem controle do conteúdo do reservatório para jusante.

A Figura 0.4 apresenta o esquema de verificação dos possíveis modo de falha de uma barragem de mineração de terra ou enrocamento.

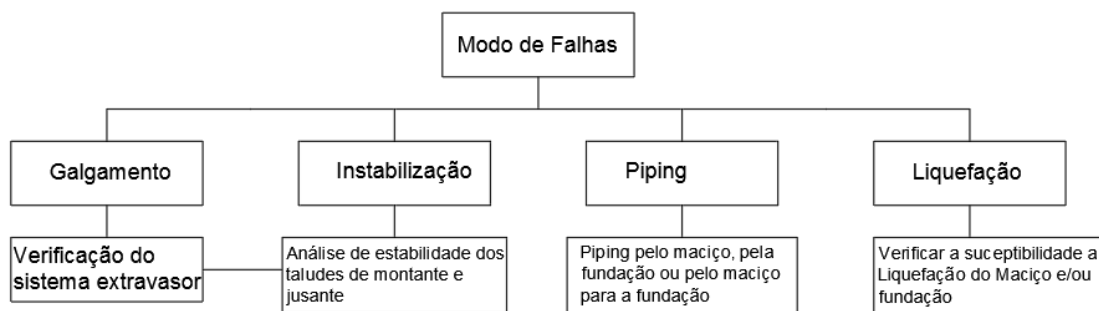


Figura 0.4 – Esquema para verificação dos modos de falhas.

A Tabela 3.1 apresenta as principais causas de cada modo de falha possíveis de ocorrer em barragens de terra ou enrocamento.

Tabela 0.2 – Principais causas associadas aos modos de falhas de barragens.

| Modo de Falha | Componente | Causa | Descrição do problema |
|-------------------------|--------------------|---|--|
| Galgamento | Reservatório | Volume para trânsito de cheias insuficiente | Volume insuficiente devido aos assoreamentos/ enchimento do reservatório com sedimento ou rejeito. |
| | Reservatório | Instabilização dos taludes no entorno do reservatório | Rompimento de um talude no entorno do reservatório ocasionando assoreamento no reservatório, ou até mesmo, ocupação do reservatório e ondas que possam galgar o maciço |
| | Sistema extravasor | Capacidade de descarga insuficiente | Capacidade de descarga insuficiente devido ao subdimensionamento do sistema extravasor ou obstrução do mesmo. |
| | Maciço | Deformação excessiva | Deformações superiores às almejadas nos dimensionamentos, com o recalque da crista e redução da borda livre |
| Instabilização | Maciço/ Fundação | Baixa Resistência dos materiais | Materiais com baixa resistência condicionantes para a estabilidade da estrutura. |
| | Maciço | Poropressão elevada | Poropressões superiores às almejadas de projeto, causadas pela falha do sistema de drenagem interna. |
| | Maciço | Erosões | Problemas que podem ser causados por falha ou inexistência do sistema de drenagem superficial |
| | Maciço/ Fundação | Sismo natural ou induzido | Ocorrência de sismos naturais ou induzidos de magnitudes excepcionais (detonações, tráfego de equipamentos pesados, ruptura de taludes ou pilhas adjacentes). |
| | Reservatório | Rebaixamento rápido | Rebaixamento rápido pode ocasionar o escorregamento do talude de montante |
| Piping (erosão interna) | Maciço/ fundação | Ausência de drenagem interna | Ausência de sistema de drenagem interna, permitindo o carreamento de partículas de solo |
| | Maciço/ fundação | Sistema de drenagem interna existente ineficiente | Sistema de drenagem interna ineficiente, permitindo o carreamento de partículas de solo |
| | Maciço | Deformações excessivas, com trincas | Formação de trincas internas e recalques diferenciais, criando caminhos preferenciais dentro do maciço. |
| | Maciço/ fundação | Materiais com potencial de erodibilidade ou instabilidade interna (sufusão) | Existência de materiais instáveis, ou seja, que não sejam auto cicatrizantes |
| | Maciço/ Fundação | Zona de alta permeabilidade e/ou ausência no tratamento de fundação | Fluxo concentrado em regiões de alta permeabilidade |
| | Maciço/ Fundação | Materiais enterrados | Fluxo concentrado no contato do solo com concreto (ou outro Material). |
| Liquefação | Maciço/ Fundação | Carregamento rápido | Geração de excesso de poropressão causada por carregamento rápido em materiais susceptíveis a liquefação |
| | Maciço/ Fundação | Abalo sísmico ou vibrações induzidas | Geração de excesso de poropressão causada por abalo sísmico em materiais susceptíveis a liquefação |
| | Maciço/ Fundação | Aumento das tensões cisalhantes | Aumento das tensões cisalhantes causadas por remoção de materiais no pé da estrutura, gerando excesso de poropressão nos materiais susceptíveis a liquefação |

Para barragens de terra todos os modos de falha aqui apresentados deverão ser verificados, seguindo os seguintes critérios:

- Galgamento: Verificado o dimensionamento do sistema extravasor, obedecendo os critérios da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**
- Instabilidade: Realizando análises de estabilidade, conforme cenários apresentados na Tabela 0.1;
- Piping (Erosão Interna): Dimensionar o sistema de drenagem interna e aplicar o critério de filtro, conforme preconizado na NBR 13028/2017.
- Liquefação. Verificar a susceptibilidade dos materiais de fundação e maciço. Caso estes materiais sejam susceptíveis, deverão ser realizadas análises de estabilidade considerando parâmetros não drenados, conforme preconizado na Resolução 13 da ANM.

GALGAMENTO

Galgamento pode ser definido como a passagem de água sobre o maciço ou ombreiras da barragem, podendo levar à ruptura por erosão no pé da barragem, instabilização ou erosão do talude de jusante.

Para que não ocorra o galgamento da barragem, é necessário o dimensionamento do sistema extravasor. As dimensões do sistema extravasor devem ser obtidas a partir do estudo de vazões máximas, que consiste em definir a vazão de cheia para determinado período de retorno (TR), a ser utilizada no dimensionamento hidrológico-hidráulico destes, garantindo a segurança dos sistemas mesmo em eventos extremos de cheia. O período de retorno deve ser definido a partir das consequências de falha estrutural e obedecendo à fase da vida útil da estrutura (fase operacional ou de fechamento) e após a vida útil.

Quando o volume para amortecimento de cheias atingir o valor do volume de espera, deve-se interromper a operação da barragem para a manutenção da segurança da estrutura frente à cheia de projeto, devendo-se proceder ao alteamento do maciço ou adequar a geometria do vertedouro.

É recomendável, segundo análise do projetista, a manutenção de borda livre acima do nível d'água *maximum maximorum*. Esta borda livre fornece um fator de segurança contra variações de ondas, variações de elevação de crista e de construção. Para barragens alteadas por método a montante ou linha de centro, a definição do nível d'água *maximum maximorum* deverá corresponder à praia mínima requerida, que deve ser mantida durante o evento de cheia.

A Tabela 0.3 apresenta os períodos de retorno mínimos de referência para cada nível de consequências esperadas dada uma falha estrutural da barragem. Na ausência de informações ou critérios específicos mais rigorosos para o enquadramento das consequências pode ser utilizado por dano potencial associado da barragem, advindo da classificação em legislação vigente.

Tabela 0.3 - Tempo de retorno mínimo a ser considerado para dimensionamento do sistema extravasor em função das consequências ou legislação vigente (NBR 13028).

| Consequências ou dano potencial | Período de retorno de projeto (período operacional) | Período de retorno de projeto (período de fechamento) |
|--|--|--|
| Baixa | 200 anos a 500 anos | 10000 anos ou PMP |
| Média | 500 anos e 1000 anos | 10000 anos ou PMP |
| Alta | 1000 anos e PMP | 10000 anos ou PMP |

Como resultado das simulações de trânsito de cheias são obtidos os hidrogramas afluentes e defluentes do reservatório da barragem, bem como a sua sobrelevação máxima para cada duração de cada chuva associada a um tempo de retorno (TR).

EROSÃO INTERNA

A erosão interna pode ser definida como carreamento de partículas de um solo, no maciço de uma barragem ou em sua fundação, pelo fluxo de percolação existente, levando-a à ruptura.

A erosão interna pode ocorrer quando as forças de percolação forem elevadas o suficiente para mover as partículas de solo, gerando um processo de erosão regressiva (“piping”). A barragem deve ser projetada e dimensionada para que não haja erosão interna tanto no maciço quanto na fundação (NBR 13028). Deve ser verificada com base nos materiais a serem empregados na construção da barragem, nos gradientes hidráulicos e na condição da fundação e das ombreiras.

Historicamente, segundo Fell et al (2000), a erosão interna é responsável por 47% das rupturas de todas as barragens de terra.

Quando um evento de falha, neste caso a erosão interna, não pode ser definido por uma formulação racional de Engenharia, analítica ou numérica, para sua avaliação probabilística, recorre-se à combinação de Árvores de Eventos com Árvores de Falhas. Esta metodologia para avaliação do potencial de erosão interna tem sido utilizada por várias organizações, incluindo o USACE (2006), o USBR (2015) e organizações australianas desde o final da década de 90. Entretanto, ela ainda se encontra em fase de desenvolvimento no mundo. A utilização do método tem como vantagem a reflexão aprofundada sobre o desenvolvimento do modo de falha e dos fatores que influenciam cada uma das etapas do fenômeno.

O fenômeno de erosão interna pode estar associado a diferentes causas, bem como pode ocorrer pelo maciço, pela fundação, do maciço para a fundação, ao longo de condutos enterrados, entre outros.

Como mecanismos de erosão interna, podem ser citadas a erosão regressiva com entubamento (piping), a sufusão e a erosão em fluxos concentrados. A probabilidade de ocorrência destes mecanismos será avaliada em função de observações de ocorrências (surgência de água, por exemplo), das propriedades dos solos (curvas granulométricas, graduação da distribuição granulométrica, índice de plasticidade), do grau de compactação do maciço (comparação com a densidade máxima do ensaio de Proctor Normal) e do teor de umidade de compactação do maciço (comparação com a umidade ótima do ensaio de Proctor Normal).

INSTABILIDADE

O dimensionamento de barragens é baseado em análises de estabilidade por meio da aplicação de métodos determinísticos, utilizando parâmetros de resistência médios ou característicos aos

materiais e adotando-se coeficientes de segurança como resultado final. Na presente metodologia serão consideradas as análises de estabilidade através da aplicação de métodos probabilísticos.

De acordo com a NBR 13028, As análises de estabilidade devem envolver, para cada etapa, isoladamente e em conjunto, o maciço de partida e a sua fundação, os maciços de alteamento (montante, linha de centro ou jusante), sua fundação e o rejeito disposto. Para tanto, as superfícies potenciais em análise devem considerar possibilidades de ruptura local e global, como:

- Os taludes entre bermas devem ser construídos para inclinações que garantam os fatores de segurança recomendados na Tabela 0.1;
- As bermas devem ter largura suficiente para atender às considerações de drenagem e instalação de instrumentos, e devem garantir o acesso dos equipamentos de manutenção com segurança;
- Para seções representativas, o ângulo geral da barragem deve ser tal que atenda aos fatores de segurança recomendados na Tabela 0.1;
- As determinações de estabilidade devem ser efetuadas para o projeto de cada estágio de implantação.

Os valores mínimos de fator de segurança a serem determinados pelas análises determinísticas de estabilidade devem considerar as condições de carregamento, drenado ou não drenado, de cada um dos materiais envolvidos.

Para condições não drenadas de carregamento, as análises de estabilidade podem ser executadas em tensões totais, com a utilização de parâmetros de resistência não drenada ou em tensões efetivas, com a utilização de parâmetros efetivos de resistência e poropressões estimadas.

Para condições drenadas de carregamento, as análises de estabilidade devem ser efetuadas em tensões efetivas, com a utilização de parâmetros efetivos de resistência ao cisalhamento e poropressões estimadas por rede de percolação. Parâmetros de resistência de pico ou residual podem

Os fatores de segurança mínimos, conforme Tabela 0.1, devem ser obtidos, independentemente do tipo de análise e das condições de carregamento:

LIQUEFAÇÃO

Conforme definido na NBR 13028, a liquefação pode ser entendida como o comportamento na ruptura de materiais granulares e/ou finos com baixa coesão, fofos, saturados e com tendência à contração que, sob solicitações ou carregamentos não drenados, gera acréscimo de poropressão e conseqüente redução da tensão efetiva, caracterizando uma queda substancial na resistência ao cisalhamento não drenado. Nas barragens com potencial de liquefação, deve-se avaliar a segurança utilizando envoltórias de resistências não drenadas, que apresentem comportamento contrátil, por meio de ensaios de laboratórios e/ou ensaios de campo, quando disponíveis.

Para ser suscetível à liquefação, o material deve estar saturado, ser não-coesivo e apresentar índice de vazios *in situ* superior ao crítico (comportamento contrátil durante uma ruptura não-drenada).

Os gatilhos podem estar associados a eventos estáticos ou dinâmicos, como: excesso de poropressões por carregamentos rápidos (alçamento rápido da barragem, elevação do nível do reservatório etc.), excesso de poropressões por abalos sísmicos ou vibrações induzidas (tráfego de equipamentos, detonações, rupturas de estruturas adjacentes etc.), aumento das tensões cisalhantes (remoção de material do pé da barragem, movimentação da fundação etc.), entre outras.

O modo de falha de liquefação não foi considerado para a análise quantitativa da probabilidade de ruptura dos estudos de casos aqui propostos, visto que são barragens constituídas por materiais com características dilatantes, compostas por solos argilosos compactados.

Apesar de não ter sido avaliado esse modo de falha, a metodologia aqui proposta prevê sua avaliação para as estruturas com susceptibilidade à liquefação. Nestes casos, o passo a passo deve ser o mesmo estabelecido no modo de falha de instabilidade, no entanto, nos casos de materiais susceptíveis à liquefação os parâmetros utilizados são não drenados.

O potencial de liquefação é avaliado com base principalmente em Fear e Robertson (1995) e Olson (2001 e 2016). A estabilidade é analisada pelo método do Equilíbrio Limite, representando os materiais suscetíveis por uma razão de resistência não-drenada ($su/\sigma'v_0$), enquanto os demais materiais são mantidos com suas resistências drenadas (c' e ϕ'). As resistências não-drenadas são determinadas a partir de ensaios in situ e de laboratório, sendo que os primeiros apresentam maior confiabilidade.

SEGUNDA ETAPA - CÁLCULO DA PROBABILIDADE DE RUPTURA

Kreuzer (2000), Caldeira (2008) e Pimenta (2009) definem basicamente três métodos para estimativa das probabilidades:

- *“Julgamento de engenharia: reflete o conhecimento de que se dispõe sobre a área técnica em questão. Consiste em uma estimativa subjetiva de probabilidades, mas, por vezes, é o único meio disponível quando faltam informações para quantificar as incertezas. Para esse método é essencial que se constitua um painel de peritos;*
- *Estimativa estatística com base em dados históricos: refere-se à utilização de registros históricos para estimar a frequência de falhas. Publicações como ICOLD (1995) e Foster et al. (1998) compilam estatísticas de rupturas de barragem e apresentam análises sistêmicas, sendo fontes valiosas de informação para inferência das frequências de ruptura. Importante ressaltar que o uso de registros históricos tem a limitação decorrente do conhecimento rudimentar dos fenômenos envolvidos nos casos de ruptura apresentados, além do aspecto de singularidade de cada obra.*
- *Método probabilístico ou tratamento analítico (ex.: análises de confiabilidade): trata as incertezas dos modelos e parâmetros de forma explícita, propagando-as através do sistema e expressando-as como distribuições de probabilidade. É uma forma essencialmente quantitativa para estimativa das probabilidades.”*

A seguir serão apresentadas as principais metodologias de cálculo de probabilidade de ruptura de acordo com os modos de falhas.

GALGAMENTO

A probabilidade de ruptura é calculada como o inverso do tempo de retorno ($1/TR$).

A análise do modo de falha galgamento pode ser dividida em cenários que englobam eventos que podem contribuir para a ocorrência deste modo de falha. Nesse contexto, inicialmente, pode-se listar quatro cenários distintos para avaliação:

- Cenário 1 – Galgamento devido à capacidade de descarga insuficiente em situações de cheias extraordinárias;
- Cenário 2 – Galgamento em situações de ruptura de taludes no entorno do reservatório com redução do volume disponível para trânsito e amortecimento dos hidrogramas de cheias;
- Cenário 3 – Galgamento em situações de obstrução do vertedouro com redução da capacidade de extravasão; e
- Cenário 4 – Galgamento em situações de ruptura de taludes no entorno do reservatório gerando uma onda capaz de galgar o barramento.

As seguintes informações são necessárias para aplicação dos métodos propostos, independentemente dos cenários a serem avaliados:

- Curva cota-descarga do sistema extravasor;
- Curva cota-volume atualizada do reservatório; e
- Níveis operativos notáveis do reservatório.

EROSÃO INTERNA

O cálculo da probabilidade será realizado utilizando-se aplicação de árvore de eventos e, para cada nó da árvore de eventos, será analisada uma árvore de falhas.

Serão analisados os seguintes aspectos para o cálculo da probabilidade de ruptura por erosão interna:

- Observações de ocorrências:

Observação em campo de possíveis surgências ou eventos importantes relacionados à ruptura da barragem, além das condições de operação, conservação e manutenção.

- Características do sistema de drenagem interna:

Existe uma saída para o fluxo sem filtro ou existem resultados de ensaios geotécnicos realizados nos materiais que compõem o sistema de drenagem interna, que permitirão a avaliação da suscetibilidade quanto à erosão interna.

- Propriedades dos solos suscetíveis à erosão interna:

Existem resultados de ensaios geotécnicos realizados no maciço e na fundação que permitirão a análise de suscetibilidade dos solos quanto à erosão interna.

- Grau e teor de umidade de compactação do maciço da barragem:

Existem dados de densidade máxima e teor de umidade ótima de compactação para o maciço executado e o teor de umidade e grau de compactação, especificados em projeto. A partir dessa comparação é possível analisar a suscetibilidade da estrutura quanto à erosão interna.

- Características da fundação:

Existem resultados de ensaios geotécnicos, bem como mapeamento geológico-geotécnico na fundação, que permitem avaliar a susceptibilidade da fundação quanto à erosão interna.

A partir da definição dos dois modos de falha mais prováveis de ocorrerem, será calculada a probabilidade para os dois mecanismos mais relevantes. Neste contexto serão considerados o nível d'água na condição operacional e ausência de sedimentos no reservatório, uma vez que se trata da condição mais crítica. Os modos de falha selecionados serão:

- Erosão interna pelo maciço e;
- Erosão interna pela fundação.

Relacionados a estes modos serão avaliados os mecanismos mais relevantes analisando os seguintes aspectos:

- Inexistência de condutos enterrados na fundação ou no maciço de solo compactado;
- Geometria da fundação e presença de materiais com rigidez variada;
- Grau de compactação dos aterros;
- Materiais que constituem a fundação;
- Presença de fraturas nos materiais de fundação;
- Materiais que compõem o filtro atendem os critérios indicados no *Soil Conservation Service* (SCS).

Para as barragens dos estudos de casos foram avaliados três cenários distintos, referentes a eventos iniciadores julgados como mais prováveis de ocorrer: (i) erosão interna pelo maciço, por erosão regressiva com entubamento; (ii) erosão interna pela fundação, por erosão regressiva com entubamento; e (iii) erosão interna em fluxo concentrado pelo maciço, ao longo de conduto enterrado (galeria tamponada do antigo sistema extravasor).

Segundo Von Thun (1996) apud Fell et. al. (2005), o requisito necessário para a ocorrência de

erosão interna é a presença de um ponto de saída para a percolação sem a presença de um filtro, permitindo a remoção contínua de materiais erodidos. De acordo com o USBR (2015), se existir alguma saída ou abertura, não há potencial de filtragem por não existir filtro no ponto de saída, portanto a continuação da erosão é virtualmente certa.

As análises quantitativas de riscos para o modo de falha “erosão interna de barragens” poderão ser realizadas utilizando as metodologias de Árvores de Eventos (ETA) e Árvores de Falhas (FTA).

Árvore de Eventos (ETA) é uma técnica gráfica para representar as sequências mutuamente excludentes de eventos após um evento iniciador (ABNT NBR ISO/IEC 31010:2012). Pode ser aplicada qualitativa e quantitativamente e tem como diferencial a apresentação dos cenários potenciais analisados que sucedem um evento iniciador e o impacto do sucesso ou falha dos sistemas ou funções de atenuação de uma forma gráfica bastante clara. As Árvores de Eventos são construídas, de modo geral, através de sistemas binários onde apenas se admite a ocorrência ou não ocorrência de um evento, numa determinada sequência lógica. Sua construção é sequencial, sendo conduzida da esquerda para a direita, em uma série de possíveis episódios decorrentes do evento iniciador.

O sucesso ou falha de cada estágio deve ser cuidadosamente definido para garantir que o evento em potencial estágio de falha esteja relacionado fisicamente ao desenvolvimento do fenômeno em estudo e não inclua ações relacionadas à operação ou ao tratamento remediador de eventos desfavoráveis. Nesse sentido, os conhecimentos dos fenômenos físicos relacionados aos eventos em análise devem ser estudados e compreendidos. Pode-se dizer que a aplicação desse método pressupõe o correto entendimento dos eventos relacionados ao sistema, devendo ser claramente definidos na abrangência do processo em análise e não entendidos apenas como a descrição dos estágios de funcionamento desse sistema. Assim, na identificação da sequência de eventos deve-se evitar a descrição de eventos que não estejam relacionados fisicamente ao fenômeno (Caldeira, 2005).

Árvore de Falhas (FTA) é uma técnica para identificar e analisar os fatores que podem contribuir para um evento específico indesejado (chamado “evento de topo”). Fatores causais são identificados por dedução e organizados de maneira lógica (ABNT NBR ISO/IEC 31010:2012). Ao contrário da árvore de eventos, que começa com os eventos iniciais ou causas

no lado esquerdo do diagrama e progride em direção a um maior detalhamento das consequências, a árvore de falhas começa com as consequências (e.g. rupturas), tipicamente no topo do diagrama e progride “para trás” em direção a um maior detalhamento das causas, localizadas na parte inferior do diagrama.

Para cada cenário, uma Árvore de Eventos é elaborada representando a sequência de evolução do processo erosivo por meio dos nós: (a) iniciação; (b) continuação; (c) formação do tubo; (d) progressão do tubo; (e) detecção do processo e sua intervenção; e (f) formação do mecanismo de ruptura.

A probabilidade de ocorrência de cada nó da Árvore de Eventos é determinada a partir de Árvores de Falha específicas, que dependem do tipo de evento iniciador analisado. Cada Árvore de Falha é formada por ramos que combinam as avaliações quanto ao potencial de erosão interna, incluindo as propriedades do solo submetido à percolação, o gradiente hidráulico atuante, a presença de filtro invertido na saída do fluxo, a capacidade da equipe técnica em detectar e intervir no processo erosivo, entre outras. Nos estudos realizados, foram detalhadas cada uma das Árvores de Falha e analisados os demais eventos iniciadores (diferentes cenários).

A estimativa da probabilidade de cada nó da árvore de eventos poderá ser efetuada, de acordo com o modo de falha sob análise e informações disponíveis, pelos métodos abaixo, empregados de forma isolada ou em conjunto:

- Baseada em análise probabilística;
- Utilizando árvores de falhas e planilhas de referência disponíveis na bibliografia, que avaliam os principais fatores de influência na probabilidade de ocorrência dos eventos;
e
- Empregando julgamento de engenharia e descrições verbais, no caso da ausência de referenciais técnicos adequados para o caso em estudo, ou quando estes referenciais também apresentam descrições verbais para as probabilidades.

Segundo Fell (2005) os mecanismos finais de falha potenciais para erosão interna seriam alargamento do tubo, recalque da crista ou *sinkhole*, desembriçamento ou solapamento do pé da estrutura e instabilização do talude. Salienta-se que as árvores de evento e de falha apresentadas neste procedimento consideram apenas o mecanismo final de falha de “alargamento do tubo”, o mais comum de acordo com estatísticas de ruptura de barragens como apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Tabela 0.4 – Mecanismos Finais de Falha para o Caso de Erosão Interna pelo Maciço (segundo Fell et al., 2005).

| Mecanismos de formação da brecha | Nº de casos de ruptura |
|---------------------------------------|------------------------|
| Alargamento do tubo | 22 |
| Recalque da crista ou <i>sinkhole</i> | 3 |
| Desembriçamento ou solapamento do pé | 1 |
| Instabilização do talude | 1 |
| Desconhecido | 24 |

As descrições verbais para a correspondência com a probabilidade de ocorrência do evento avaliado são as apresentadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Tabela 0.5 – Correspondência entre a Descrição Verbal da Chance de Ocorrência do Evento e o Valor de Probabilidade Adotado (Baseada em Vick, 1997; Lichtenstein & Newman, 1967 *apud* Baecher & Christian, 2003).

| DESCRIÇÃO VERBAL | PROBABILIDADE EQUIVALENTE |
|--|---------------------------|
| Virtualmente impossível | 0,01 |
| Pouco provável | 0,15 |
| Neutro Não se tem informação sobre as chances do evento ocorrer ou as chances de ocorrência são iguais. | 0,50 |
| Bastante provável | 0,70 |
| Mais provável | 0,85 |
| Virtualmente certo | 0,99 |

Foram utilizadas as árvores de falhas associadas a cada nó da árvore de eventos, com as respectivas planilhas de fatores de influência na probabilidade de ocorrência dos eventos.

A quantificação da probabilidade do nó, o cálculo das probabilidades foi realizado “de baixo pra cima”, empregando a álgebra Booleana:

Porta “E”: Probabilidade $P = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_n$;

Porta “OU”: Probabilidade $P = (1 - (1 - P_1) \times (1 - P_2) \times \dots \times (1 - P_n))$.

Ressalta-se que a metodologia aqui apresentada, em sido utilizada em nível mundial e que as tabelas apresentadas são orientativas, podendo as probabilidades de cada nó serem estimadas empregando informações estatísticas baseadas em julgamentos de engenharia, ou seja, qualitativamente. Não é ênfase dessa dissertação estudar diversas metodologias de cálculo de probabilidade para a erosão interna, sendo sugerida a aqui apresentada. Mas outras metodologias podem ser usadas, sendo importante que haja uma mensuração da probabilidade de ocorrer do referido modo de falha.

INSTABILIDADE

A avaliação do modo de falha por instabilização será desenvolvida analisando as etapas listadas a seguir:

- Definição do Modelo Geotécnico;
- Definir os parâmetros médios;
- Realizar as Análise Determinística;
- Identificação das Variáveis Aleatórias e Determinação das Medidas Estatísticas de Variabilidade;
- Aplicação do Método FOSM;
- Aplicação do Método de Monte Carlo.

Ressalta-se que a realização da análise determinística será o input da análise probabilística.

As propriedades dos materiais que constituem o maciço e a fundação de barragens e diques, em geral, apresentam grande variabilidade natural devido às condições de compactação do solo, a maneira ou processo ocorrido para a sua formação, assim como, à diversidade de materiais dos quais eles são formados.

Cabe ressaltar que o valor real de qualquer parâmetro de solo, rocha ou rejeito dificilmente será conhecido, podendo estimá-lo a partir de um número de medidas, as quais estão sujeitas a erros, tais como, a variabilidade do material, erros de amostragem e erros de ensaios (UNSW,2003).

Observa-se que, independentemente da quantidade de ensaios realizados para a determinação do parâmetro geotécnico de interesse, sempre se terá um grau de incerteza quanto ao seu valor médio e desvio padrão, pois os ensaios realizados não conseguirão abranger todos os valores possíveis para aquele parâmetro ensaiado (UNSW,2003). Assim, o número de amostras necessárias para garantir que a média amostral seja igual à média populacional será dificilmente alcançado.

Os resultados dos ensaios realizados nas amostras podem ser representados a partir de histogramas, os quais representam a frequência proporcional dos valores observados dentro de um determinado intervalo.

Os resultados de investigações de campo e laboratório são compilados e tratados. No entanto, a baixa quantidade de dados pode limitar o tratamento estatístico, sendo necessário recorrer a valores típicos de coeficiente de variação de parâmetros geotécnicos, bem como a funções de distribuição de densidade de probabilidade típicas. A Tabela 3.3 mostra o símbolo e as fórmulas utilizadas para calculá-los.

Tabela 0.6 - Formulação Aplicada aos Dados das Amostras.

| Medida | Símbolo | Fórmula |
|------------------------------|-----------|---|
| Média amostral | \bar{X} | $\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$ |
| Variância amostral | s^2 | $s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}$ |
| Desvio Padrão amostral | s | $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ |
| Coefficiente de Variação (%) | CV | $CV = \left(\frac{s}{\bar{X}}\right) 100\%$ |

Nota: n = número de elementos da amostra (X₁, X₂, X₃, ... X_n).

Na ausência de ensaios de laboratório ou de campo, recomenda-se determinar o desvio padrão da amostra por meio de coeficientes de variação. A Tabela 0.7 apresenta faixas de coeficientes de variação dos parâmetros geotécnicos de interesse para análises de estabilidade de barramentos.

Tabela 0.7 - Valores Típicos de Coeficiente de Variação de Parâmetros Geotécnicos.

| Parâmetro | Coeficiente de Variação (%) | | Fonte |
|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------|-----------|
| | Valores Reportados | Valor Recomendado | |
| Ângulo de Atrito Efetivo | 05 a 15 | 10 | (1) e (5) |
| Coesão (argila) | 20 a 80 | 40 | -3 |
| Coesão Não Drenada (argila) | 20 a 50 | 30 / 40 | (1) e (4) |
| Módulo de Elasticidade | 02 a 42 | 30 | -1 |
| Coefficiente de Permeabilidade | 20 a 90 | 90 | (2) e (4) |
| Peso Específico | 01 a 10 | 3 | (1) e (4) |
| Resistência à Tração | 15 - 29 | 20 | -1 |
| Resistência à Compressão Uniaxial | 6 - 100 | 40 | -1 |

(1) Lee et. al. (1983)

(2) USACE (1994)

(3) Assis et. al (2004)

(4) Harr (1987)

(5) USACE (2006)

Para o cálculo da probabilidade quanto à instabilidade, foram realizadas análises para se obter

os fatores de segurança por meio do programa Slide ® da Rocscience, pelo método do Equilíbrio Limite, utilizando o método de cálculo de Spencer e o critério de resistência de Mohr-Coulomb. Os níveis piezométricos/ freáticos foram definidos por meio das interpretações os instrumentos de auscultações das barragens.

A determinação dos limites inferior e superior do intervalo de dados que representam a variável aleatória pode ser feita a partir de regras que se baseiam na distribuição normal (USACE, 2006). A Figura 0.5 mostra uma função de densidade de probabilidade normal com a porcentagem de área abaixo da curva para o valor médio mais ou menos um desvio padrão (variação de 2σ), mais ou menos dois desvios padrão (variação de 4σ) e mais ou menos três desvios padrão (variação de 6σ).

Para o último caso, ou seja, mais ou menos três desvios padrão, 99,7% de todos os valores possíveis da variável aleatória estão incluídos neste intervalo. Similarmente, considerando mais ou menos dois desvios padrão esse valor passa a ser 95,5%. Finalmente, considerando mais ou menos um desvio padrão, 68,3% de todos os valores possíveis estão dentro deste intervalo.

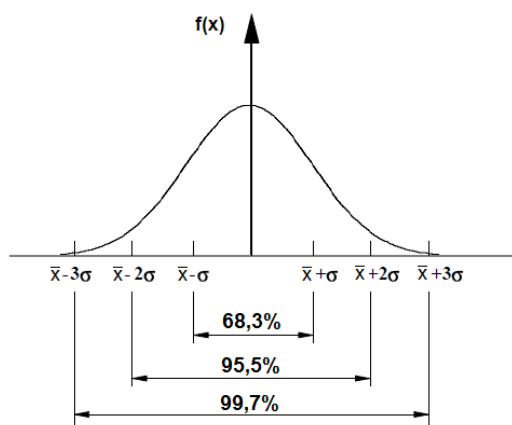


Figura 0.5 – Distribuição Normal.

Como recomendação geral do presente procedimento, se há praticamente 100% de confiança na estimativa dos limites superior e inferior da variável aleatória, deve ser utilizada uma variação de mais ou menos três desvios padrão em torno da média. Para um nível de confiança de 95%, deve ser utilizada uma variação de mais ou menos dois desvios padrão em torno da média. Cabe ressaltar novamente que os limites utilizados devem levar em consideração o julgamento de engenharia e o significado físico dessa variação.

As análises de estabilidade determinísticas foram realizadas segundo o critério de ruptura de Mohr–Coulomb e o método de equilíbrio limite de Spencer, para rupturas de forma circular, em que a verificação da estabilidade de uma determinada superfície de ruptura é obtida através fator de segurança (FS), definido como a razão entre o somatório dos esforços resistentes e das forças atuantes. Para tal, foi utilizado o software SLIDE 7.0 desenvolvido pela Rocscience. Adotou-se o método *Spencer* (1967), por se tratar de um método rigoroso, que avalia a estabilidade com base no equilíbrio de forças e momentos.

A análise probabilística se diferencia da determinística, principalmente, por considerar a variabilidade dos parâmetros. A maioria dos dados de entrada em uma análise de estabilidade de taludes não é conhecida com precisão. A variabilidade se deve à dispersão dos resultados de ensaios ou à variabilidade natural no valor da grandeza que existe de um ponto a outro no talude. Há, portanto, uma distribuição de valores para cada parâmetro, o que faz com que sejam considerados variáveis aleatórias. Dessa maneira, conclui-se que o próprio fator de segurança é uma variável aleatória, que depende de muitas variáveis de entrada e possui sua própria distribuição. Existem três métodos probabilísticos comumente usados no meio geotécnico: FOSM (Primeira Ordem e Segundo Momento), Pontos de Estimativa (Rosenblueth) e Monte Carlo.

Foram aplicados os métodos de cálculo de probabilidade FOSM e Monte Carlo. Recomenda-se, portanto, que o FOSM seja o primeiro método probabilístico a ser aplicado dada a sua simplicidade e os resultados que o mesmo proporciona.

MÉTODO FOSM

O método FOSM (“First Order Second Moment”) foi inicialmente utilizado em projetos da indústria de aço (Kottegoda & Rosso, 1974 apud Maia, 2003). É um método que usa os primeiros termos de uma expansão da série de Taylor da função de desempenho (i.e. fator de segurança) para estimar o valor esperado (médio) e a variância da função de desempenho.

O método FOSM corresponde a um método probabilístico que pode ser empregado para uma estimativa preliminar da probabilidade de ruptura. Além disso, o método permite saber a contribuição de cada variável aleatória na variância do fator de segurança, o que possibilita a

seleção das variáveis aleatórias mais importantes para a realização do próximo estágio da análise probabilística, com a aplicação do método de Rosenblueth e/ou Monte Carlo.

O truncamento da função de expansão da Série de Taylor forma a base deste método. Assumindo múltiplas variáveis aleatórias de dados de entrada, mas independentes entre si, as equações do método FOSM correspondem a:

$$E[FS] = F\left(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N\right) \quad (3.1)$$

$$V[FS] = \sum_1^n \left(\frac{\delta FS_i}{\delta X_i}\right)^2 \times V[X_i] \quad (3.2)$$

onde:

F = função de desempenho que, neste caso, se refere ao fator de segurança (FS);

E [FS] = valor médio esperado para F;

V [FS] = variância de F, igual ao quadrado do seu desvio padrão;

δFS_i = Variação de F que ocorre quando se variam de um valor igual a ΔX_i cada um dos n parâmetros X_i ;

δX_i = Taxa de variação das variáveis envolvidas no estudo;

V [X_i] = variância de cada um dos X_i .

O valor de δFS_i corresponde à variação do FS quando se varia cada um dos n parâmetros X_i de um valor δX_i , recomendado entre 5 e 10%, mantendo-se as demais variáveis constantes.

Se o número de variáveis aleatórias é igual a n, este método requer a realização de n + 1 análises.

A Tabela 0.8 apresenta, de forma sucinta, as etapas para aplicação do método FOSM.

Tabela 0.8 – Método FOSM.

| Etapas | Descrição |
|---|--|
| Identificação das variáveis aleatórias, condicionantes para o Fator de Segurança | Por meio de análise de estabilidade determinísticas. |
| Obtenção dos parâmetros dos materiais condicionantes nas análises de estabilidade | Obtido pelas análises de ensaios de laboratório e campo |
| Cálculo do desvio padrão de cada variável aleatória | Tratamento estatísticos dos dados. Na falta de representatividade, será utilizado coeficiente de variação para determinação do desvio padrão. |
| Cálculo do Fator de Segurança Médio | Calcula F.S médio utilizando os parâmetros médios |
| Aplicação de taxa de incremento no valor médio de cada variável aleatória e cálculo das derivadas parciais de F.S | Aplicar taxa de incremento entre 5% e 10%. Cada iteração será feita aplicando-se a taxa de incremento em uma variável e mantendo as mais constantes. Calcula-se a variação no valor de F.S. Em seguida calcula-se as derivadas parciais. |
| Cálculo da variação do Fator de Segurança | Calcular a variância do F.S, conforme Eq.2. |
| Cálculo da probabilidade de ruptura | Assumindo uma função de densidade de probabilidade para F.S , deve-se calcular a probabilidade de ruptura (distribuição normal ou log normal). |
| Cálculo da contribuição relativa de cada variável aleatória na variação F.S. | Essa contribuição pode ser representada graficamente, sendo resultante da aplicação da Eq.2. As variáveis aleatórias que apresentam maior relevância poderão ser selecionadas para a próxima etapa da análise probabilística |

Observa-se que a aplicação do método FOSM requer a realização de $n + 1$ análises, em que n é o número de variáveis aleatórias utilizadas. Uma análise será, portanto, realizada com os parâmetros médios, obtendo o fator de segurança médio e as demais análises serão realizadas variando cada variável aleatória por uma taxa de incremento de 5 a 10% e mantendo as demais variáveis constantes.

Desta forma, deverá ser calculada, para cada iteração i , a derivada parcial $\delta FS_i / \delta X_i$ apresentada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Essa derivada corresponde à diferença entre o fator de segurança obtido na iteração i e o fator de segurança médio dividido pela variação da variável aleatória. Aplicando a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, calcula-se a variância do FS.

Vale observar que o método FOSM calcula a variância de FS tendo como base tão somente o mecanismo de ruptura obtido com os parâmetros médios.

O método FOSM permite, além do cálculo da probabilidade de ruptura, a verificação da contribuição relativa de cada variável aleatória no valor total da variância do fator de segurança.

Desta forma, pode-se utilizar esse resultado para selecionar quais variáveis aleatórias são mais importantes na variação do FS e utilizar somente essas variáveis na próxima etapa de análise com a aplicação de outro método probabilístico (Rosenblueth e/ou Monte Carlo, por exemplo).

O método FOSM apresenta como vantagens o fato de ser um método simples e que fornece resultados importantes, tais como a probabilidade de ruptura e a contribuição de cada variável aleatória na variação do fator de segurança. O método apresenta, portanto, um ganho em relação à análise de sensibilidade convencional, pois quantifica de maneira estruturada e metodológica a influência de cada variável.

Como ponto negativo está o fato de que se deve assumir uma distribuição estatística para o FS no cálculo da probabilidade de ruptura e, conseqüentemente, os resultados podem variar dependendo da função escolhida. Além disso, pode-se ter uma variação na porcentagem de contribuição de cada variável aleatória em função da taxa de incremento utilizada. Contudo, em geral, essa variação não compromete de maneira importante os resultados fornecidos pelo método.

Observa-se também que o método FOSM não pode ser aplicado aos casos em que a posição da superfície crítica se altera de forma significativa em função da variação das variáveis aleatórias. Neste caso, recomenda-se a aplicação dos métodos de Rosenblueth ou Monte Carlo.

A escolha deste método como primeira etapa é devido à sua simplicidade e por ele auxiliar a definir a contribuição de cada parâmetro na variância do fator de segurança.

Para cada análise, efetuou-se um acréscimo de 10% na média de um parâmetro, mantendo-se os demais com seu valor médio.

MÉTODOS MONTE CARLO

O método Monte Carlo foi utilizado pela primeira vez como uma ferramenta de pesquisa no desenvolvimento dos trabalhos da bomba atômica durante a Segunda Guerra Mundial (Hammersley & Handscomb, 1964 apud Maia, 2003). Trata-se de um procedimento iterativo que abrange quatro passos, descritos abaixo (Willie & Mah, 2004):

- Estimativa das distribuições de probabilidade para cada um dos parâmetros de entrada considerados como variáveis;
- Geração de valores aleatórios para cada parâmetro;
- Cálculo dos valores das forças atuantes e resistentes e verificação se as forças resistentes são maiores do que as atuantes;
- Repetição do processo N vezes ($N > 100$) e, em seguida, determinação da probabilidade de ruptura Pf de acordo com a seguinte equação;

O método Monte Carlo corresponde a um método probabilístico que permite a determinação de uma função de distribuição do fator de segurança, a partir da qual se pode determinar a média e o desvio padrão do FS, além da probabilidade de ruptura. Trata-se de uma experimentação numérica, sendo avaliados diversos resultados da função resposta (FS - Fator de Segurança) variando-se os parâmetros de entrada. Este método proporciona um resultado “exato” à medida que o número de simulações tende ao infinito. Por esta razão, ele também é conhecido como um método de “força bruta”, apresentando robustez e simplicidade. Ele permite solucionar problemas muito complexos, sem limite de número de variáveis nem do seu tipo de distribuição de probabilidades.

$$Pf = \frac{N-M}{N} \quad (3.3)$$

Em que: M é o número de vezes em que a força resistente excedeu as forças atuantes (ou seja, que o fator de segurança é maior que 1,0).

A probabilidade de ruptura por instabilização foi avaliada utilizando o método probabilístico de simulações de Monte Carlo.

De maneira resumida, segue as etapas do processo Monte Carlo na Tabela 0.9:

Tabela 0.9 – Processo Monte Carlo.

| Etapas | Descrição |
|---|---|
| Identificação das variáveis aleatórias, condicionantes para o Fator de Segurança | Por meio de análise de estabilidade determinísticas, análise de sensibilidade e aplicação do método FOSM. |
| Obtenção dos parâmetros dos materiais condicionantes nas análises de estabilidade | Obtido pelas análises de ensaios de laboratório e campo |
| Cálculo do desvio padrão de cada variável aleatória | Tratamento estatísticos dos dados. Na falta de representatividade, será utilizado coeficiente de variação para determinação do desvio padrão. |
| Distribuição de probabilidade para cada variável aleatória | Calcular os parâmetros estatísticos e a distribuição probabilística para cada variável aleatória |
| Elaborar análise de estabilidade probabilística | Utilizar software para análise de estabilidade probabilística, aplicando as variáveis estatísticas e número de iterações. |
| Cálculo do Fator de Segurança | Registrar o número de vezes que o fator de segurança foi menor que 1, ou seja, que há o rompimento do talude. |
| Determinar a probabilidade de ruptura | A probabilidade de ruptura será calculada pelo número de vezes que o F.S <1, dividido pelo número de iterações N. |

De maneira geral, as simulações realizadas pelo método Monte Carlo utilizam as análises convencionais de busca da superfície crítica e do fator de segurança mínimo. Contudo, essas análises são repetidas milhares de vezes até a convergência do método. Além disso, as variáveis aleatórias são representadas por funções de densidade de probabilidade e os valores determinísticos são representados como constantes.

O método Monte Carlo usa um gerador de números aleatórios para selecionar o valor de cada variável aleatória de acordo com a função de densidade de probabilidade especificada. Para cada iteração (análise), um fator de segurança é calculado. Ao término de um número N de iterações, a probabilidade de ruptura (Pf) é calculada dividindo-se o número de iterações, para os quais o F.S. foi inferior a 1,0, pelo número total de iterações realizadas.

Como observado anteriormente, quando se aplica o método Monte Carlo, cada variável aleatória deve ser representada por uma função de densidade de probabilidade. Existem diversas funções de densidade de probabilidade, porém as mais comumente utilizadas em engenharia geotécnica são a distribuição uniforme, a distribuição triangular, a distribuição normal e a distribuição lognormal. Recomenda-se que outras funções de distribuição sejam utilizadas no caso de existirem dados de ensaios que se ajustem a essas funções.

A USACE (2006) listou parâmetros que são utilizados em engenharia geotécnica e as funções de densidade de probabilidade que tipicamente melhor representam aqueles parâmetros, tal

como mostra a Tabela 0.10. Essa tabela pode ser utilizada para orientar a escolha da função de densidade de probabilidade que melhor represente a variável aleatória.

O método Monte Carlo apresenta como vantagem o fato de ser um método robusto e que fornece uma função de distribuição do fator de segurança como resultado das N iterações realizadas, permitindo o cálculo do fator de segurança médio probabilístico, desvio padrão e probabilidade de ruptura.

Além disso, o método permite que sejam utilizados diferentes tipos de distribuição e qualquer número de variáveis aleatórias, as quais podem ou não ser independentes entre si (Harr, 1977; Athanasiou-Grivas, 1980 citado por Willie & Mah, 2004).

Como desvantagem do método pode-se citar o grande número de iterações necessárias para a convergência do processo, o qual pode ser muito lento. Observa-se, no entanto, que essa desvantagem pode ser minimizada pelo fato de que ferramentas computacionais de análise de estabilidade de taludes já apresentam inserido o método Monte Carlo como ferramenta para análise probabilística.

Tabela 0.10 - Funções de Densidade de Probabilidade para Variáveis Aleatórias em Engenharia Geotécnica (USACE, 2006).

| Parâmetro | Função de Densidade de Probabilidade | Referência |
|---|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Variáveis que não podem tomar valores negativos | LN | Lacasse & Nadim (1996) ¹ |
| Pesos específicos | N | Lacasse & Nadim (1996) |
| Resistência de Cone: | | |
| Areia | LN | Lacasse & Nadim (1996) |
| Argila | N/LN | Lacasse & Nadim (1996) |
| Resistência ao cisalhamento não drenada S_u : | | |
| Argila | LN | Lacasse & Nadim (1996) |
| Silte Argiloso | N | Lacasse & Nadim (1996) |
| Razão S_u/s'_v0 - Argila | N/LN | Lacasse & Nadim (1996) |
| Limites líquido e plástico | N | Lacasse & Nadim (1996) |
| Ângulo de atrito - Areia | N | Lacasse & Nadim (1996) |
| Índice de vazios e porosidade | N | Lacasse & Nadim (1996) |
| Razão de sobreadensamento | N/ LN | Lacasse & Nadim (1996) |
| Informações limitadas: | | |
| Apenas valor mais alto & mais baixo | U | Mosher ² |
| Mais alto, mais baixo & mais provável | T | Mosher |
| Sem informação | U | Hobbs ³ |
| Distribuições resultantes de: | | |
| Soma | N | - |
| Multiplicação | LN | - |

N: distribuição normal

N/LN: distribuições normal e lognormal

LN: distribuição lognormal

U: distribuição uniforme

T: distribuição triangular

1 Lacasse, Suzanne, and Nadim, Farrokh (1996), "Uncertainties in Characterizing Soil Properties," Uncertainty in the Geologic Environment: From Theory to Practice, ASCE Geotechnical Special Report No. 58, Volume 2, American Society of Civil Engineers, New York, NY, 1996.

2 Mosher, David, (1997), PROSPECT Training Course: "Risk Analysis for Water Resources Planning and Management."

3 Hobbs, Benjamin, (1997), PROSPECT Training Course: "Risk Analysis for Water Resources Planning and Management."

Para os estudos de casos, foram utilizados os métodos de FOSM e Monte Carlo.

Realizou-se análises estatísticas dos resultados dos ensaios laboratoriais executados, de modo a obter o valor médio (μ), o desvio-padrão (σ) e o tipo de distribuição de probabilidades dos parâmetros geotécnicos peso específico (γ), coesão efetiva (c') e ângulo de atrito efetivo (ϕ').

Conforme recomendação da USACE (2206), apresentado na Tabela 0.10, adotou-se a distribuição Normal para representar o peso específico e o ângulo de atrito efetivo, e a distribuição Log-normal para a coesão efetiva. De maneira conservadora, optou-se por considerar tais parâmetros como independentes entre si (coeficiente de correlação $\rho = 0$).

Foram realizadas 100.000 simulações, variando-se aleatoriamente os parâmetros geotécnicos por meio de um gerador de números aleatórios. Para cada nova simulação, calculou-se uma nova superfície de ruptura crítica global.

LIQUEFAÇÃO

Assim como no modo de falha de instabilidade, o cálculo da probabilidade do modo de falha de liquefação é obtido por meio de análise de estabilidade. A diferença está nos parâmetros não drenados aplicados aos materiais susceptíveis ao fenômeno de liquefação.

TERCEIRA ETAPA – CONSEQUÊNCIA

Para mensurar as consequências de uma hipotética ruptura de uma barragem, deverão ser realizados estudos que definem manchas de inundação, simulando diferentes cenários que incluem dias chuvosos ou secos, com ou sem a ruptura.

As consequências incluem os números previstos de pessoas mortas e feridas, a extensão dos prejuízos materiais nas propriedades, nos edifícios e nas infraestruturas, os custos da desorganização da atividade econômica e os danos em recursos naturais, culturais e históricos, por efeito do cenário de ruptura (Caldeira, 2005).

Os potenciais danos decorrentes de uma ruptura de barragem podem ser definidos como toda mudança provocada nos sistemas naturais, sociais e econômicos. Estes danos podem ser distinguidos entre (i) tangíveis, aqueles passíveis de mensuração em termos monetários; e (ii) intangíveis, que se relacionam a bens de difícil quantificação ou quando, por razões éticas ou ideológicas, é considerada indesejável ou inapropriada sua valoração. É importante mencionar que, muitos bens, hoje intangíveis, podem tornar-se passíveis de mensuração no futuro (CANÇADO, 2009; GREEN, PARKER & TUNSTALL, 2000).

Um segundo critério de classificação decompõe os danos em:

- **Diretos:** aqueles que podem ser diretamente atribuídos à ocorrência de um acidente/incidente e, em geral, são resultantes do contato físico da água, destroços, solos e dos sedimentos com o bem atingido. Nessa categoria estão incluídos: danos decorrentes da destruição ou degradação de propriedades públicas e privadas e a perda ou desgaste de bens públicos e privados decorrente da ação física, química e biológica das águas, do solo e/ou da deposição de sedimentos, relacionados ao acidente (MACHADO, 2005);
- **Indiretos:** ocorrem quando atividades sociais e econômicas são interrompidas por causa da inundação. Como simplificação, qualquer dano decorrente da inundação que não seja direto, é considerado indireto. Os danos indiretos levam à redução da atividade econômica, custos de serviços de emergência e de defesa civil, custos de limpeza de áreas atingidas, perdas de valor de propriedades, aumentos em valores de seguros para cobrir danos, desemprego ou redução de salários, entre outros (MACHADO, 2005).

A estimativa das consequências no âmbito da saúde e segurança, causadas na área de influência da mancha de inundação é sintetizada na valoração de indenizações decorrente da perda de vidas humanas, nos custos com serviços de emergência e com serviços de saúde.

Na presente metodologia as consequências não serão mensuradas por custo e sim por perda de vida, estando o risco aceitável determinado por meio de uma probabilidade de ocorrência do modo de falha e número de vítimas atingidas num hipotético rompimento da barragem.

Para o presente estudo, as consequências serão mensuradas com base no número de perdas de vidas humanas causadas na área de influência da mancha de inundação, obtida numa simulação de um estudo hipotético do rompimento da barragem.

Serão consideradas como perda de vítimas a população no trecho da mancha de inundação caracterizada como ZAS (Zona de alto salvamento), região está onde a mancha de inundação chega em menos de meia hora ou estão a menos de 10km de proximidade com a barragem.

Seriam as vítimas que não teriam condições de se salvar num eventual rompimento da barragem.

O número de habitantes por domicílio foi estimado com base na média populacional por domicílio do respectivo setor censitário hipoteticamente atingido

QUARTA ETAPA - CÁLCULO DO RISCO

O cálculo do risco pode ser realizado de maneira qualitativa, semiquantitativa ou quantitativa.

Nas Análises de Risco Qualitativas são utilizadas formas descritivas e escritas para caracterizar as várias partes envolvidas nos riscos associados a um sistema, tais como os modos, os cenários e os mecanismos de ruptura e os fatores de exposição, bem como as consequências previsíveis.

As Análises de Risco Quantitativas são baseadas em valores numéricos das probabilidades e das consequências, de forma que representem pontos de vista matemáticos e físicos das grandezas envolvidas nos cenários analisados. Nessas análises são determinadas de forma concreta as probabilidades, recorrendo-se à teoria das probabilidades e ao tratamento estatístico dos dados. É feita também uma análise de consequências.

Atualmente, de acordo com as legislações de barragens vigentes, o risco é mensurado qualitativamente, sendo indicado como baixo, médio ou alto (Tabela 0.18).

São pontuadas as características físicas da estrutura, o estado de conservação, as informações documentais e, por fim, o dano potencial num hipotético rompimento.

Visando mensurar o risco quantitativamente, são propostas algumas metodologias, nas quais a estimativa de risco será obtida na relação direta da frequência de ocorrência (F) de cada modo de falha com o número de vítimas (N).

A construção da curva F-N pressupõe o conhecimento dos pares ordenados f (frequência) e N (número de vítimas) para cada modo de falha. A curva é obtida a partir da plotagem da frequência acumulada dos cenários acidentais com N ou mais vítimas (F, eixo y) e o número de vítimas fatais de cada cenário (N, eixo x). O número N de vítimas fatais de cada cenário

acidental é determinado a partir do conhecimento da distribuição populacional na região de interesse e da probabilidade de fatalidade para essa população, decorrente dos efeitos físicos do modo de falha.

A atividade de apreciação de risco trabalha com a definição de critérios de aceitabilidade e tolerabilidade dos riscos, constituindo-se provavelmente no tema mais polêmico no universo da gestão de risco. Os critérios de aceitabilidade e tolerabilidade representam os limites máximos admissíveis para o risco. Sua terminologia, de divulgação amplamente aceita atualmente, é definida pelo Health & Safety Executive – HSE, órgão executivo para a saúde e a segurança do Reino Unido, país possuidor de uma longa tradição de regulamentação nessas áreas, que remonta ao século XIX. A maioria das recomendações internacionais em tolerabilidade é baseada nesta definição.

De acordo com MELO (2014), no caso de barragens, tem-se o agravante de envolver riscos cujas consequências podem abranger um número elevado de perdas de vidas, embora associados a probabilidades de ocorrências extremamente baixas. É perceptível na mídia como a sociedade valoriza de forma diferente os acidentes de reduzida probabilidade e elevada consequência (ex: acidentes aéreos) e aqueles de alta probabilidade e baixa consequência (acidentes de transporte terrestre), mesmo que os riscos calculados (probabilidade x consequência) sejam equivalentes.

Existem vários critérios de aceitabilidade e tolerabilidade propostas para a gestão de risco de barragens, tais como ANCOLD (Austrália), EUA (USBRE) e CDA (Canadá). Todos correlacionam probabilidade de falha com número estimado de perda de vidas.

A Figura 0.6 apresenta o critério para a avaliação do risco social utilizada pela CETESB no qual se plota a curva F-N do empreendimento contra o critério, de forma a possibilitar a avaliação da tolerabilidade do risco. O critério delimita três regiões de risco: tolerável, a ser reduzido e intolerável.

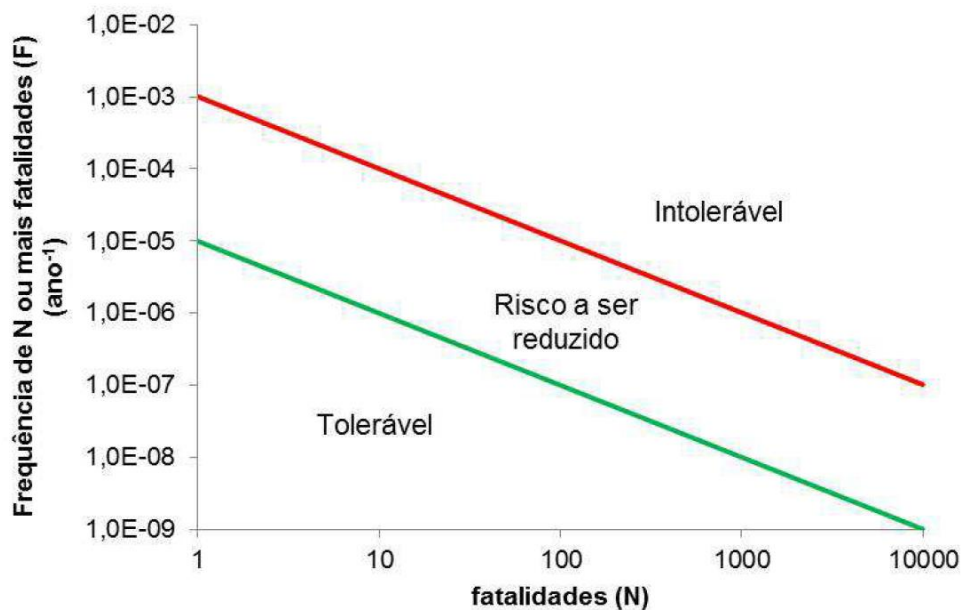


Figura 0.6 – Critério de tolerabilidade para risco (CETESB, 2011).

A curva do empreendimento situada na região de risco tolerável aponta a presença de risco residual que deve ser gerenciado por meio de um Programa de Gerenciamento de Risco.

Conforme proposto pela CETESB (2011), a curva situada total ou parcialmente na região de risco intolerável indica a inviabilidade do projeto, tal como proposto. A adoção de medidas para a redução do risco, deve ter como meta situar a curva F-N integralmente na região de risco a ser reduzido ou, preferencialmente, na região de risco tolerável. O cenário acidental com $N > 10000$, independentemente de F, deve ser desenvolvido no estudo e incorporado à curva do empreendimento. A tolerabilidade do risco, nessa condição, será avaliada pelo empreendedor ou órgãos fiscais.

Nos critérios propostos para barragens pela ANCOLD (Caldeira, 2005) que relacionam a “probabilidade anual de ruptura de barragens originando vítimas” como “número de vítimas devido à ruptura de barragens” podem ser especificadas três zonas: a zona de riscos aceitáveis, a de riscos inaceitáveis e a intermédia, a de riscos toleráveis, para qual é aplicável o princípio ALARP (As Low As Reasonably Practicable).

Segundo CNPGB (2005), ALARP é um princípio metodológico que estabelece que os riscos, inferiores ao limite de tolerabilidade, só são toleráveis se a sua redução for impraticável ou se os custos associados a essa redução forem desproporcionais aos benefícios. O princípio ALARP

estipula a revisão periódica destes riscos, assumidos toleráveis, se a sua redução for impraticável ou se os custos associados a esta redução forem fortemente desproporcionados relativamente aos benefícios daí decorrentes (ICOLD,2005). No conceito ALARP, o dono da barragem tem de provar que as medições do risco apresentam uma grande desproporção entre o esforço para reduzir riscos adicionais (alto) e a redução do risco que seria realizada com este esforço (baixo).

No âmbito da gestão de barragens, estima-se, de acordo com a ANCOLD (1994), que o valor de risco tolerável está compreendido entre 10^{-6} e 10^{-8} . O critério de aceitabilidade da ANCOLD varia com a probabilidade de ruptura variando com o número de vítimas, conforme ilustrado na Figura 0.7.

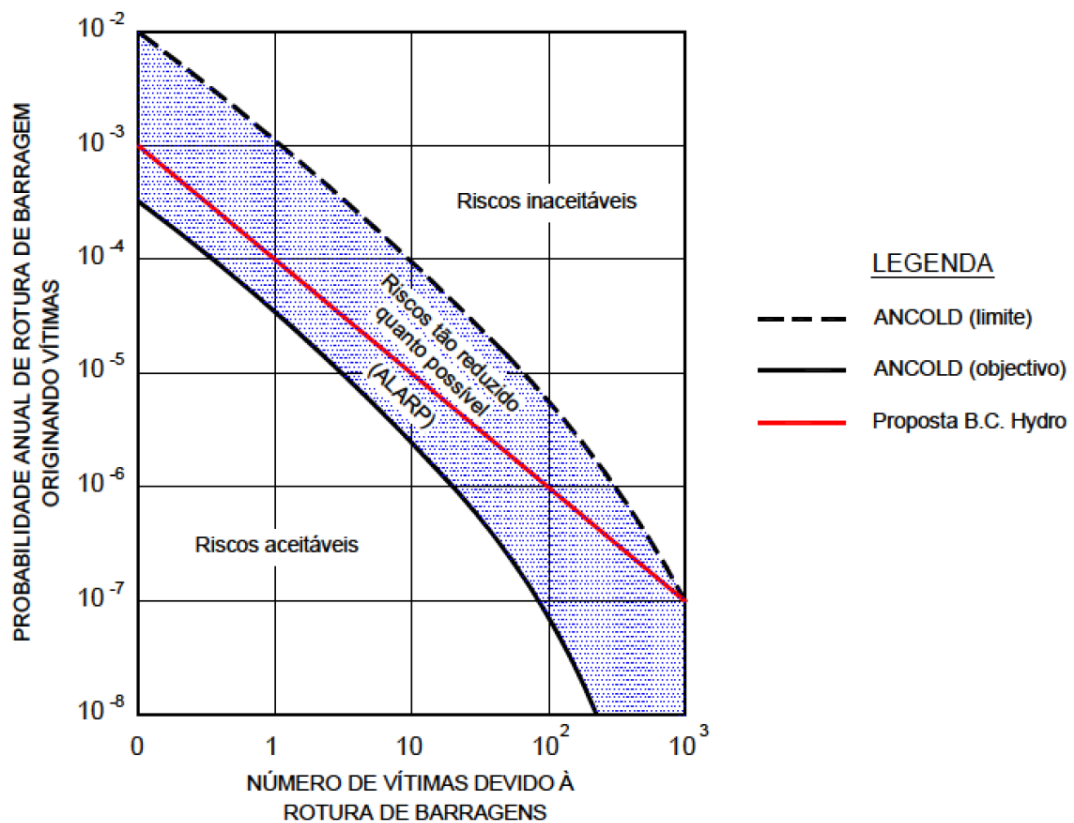


Figura 0.7 – Critério de aceitabilidade do risco (ANCOLD, 1994).

A Figura 0.8 apresenta o critério de aceitabilidade proposto pelo CDA.

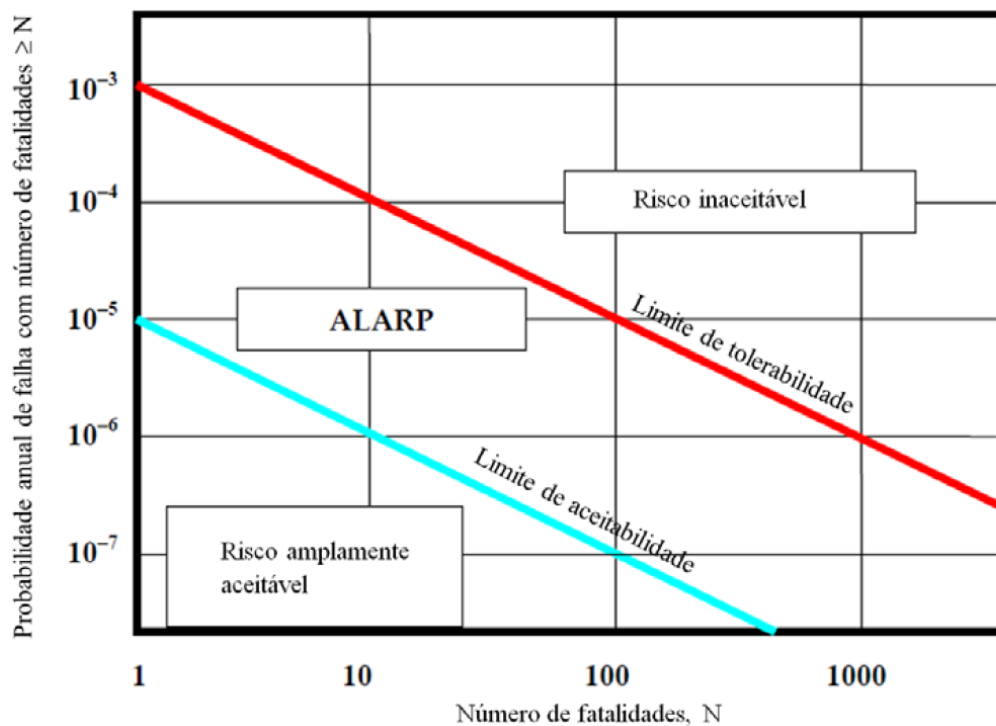


Figura 0.8 – Critério de Risco aceitável CDA (2007).

De modo geral, podem-se distinguir três zonas na análise das curvas F-N, em conformidade com os princípios definidos por HSE (2001): a zona de riscos aceitáveis; a de riscos inaceitáveis; e a intermediária, de riscos toleráveis, onde se aplica o princípio ALARP. A separação entre as zonas é realizada pelos limites de aceitabilidade e tolerabilidade.

Outros critérios internacionais estão apresentados na Figura 0.9.

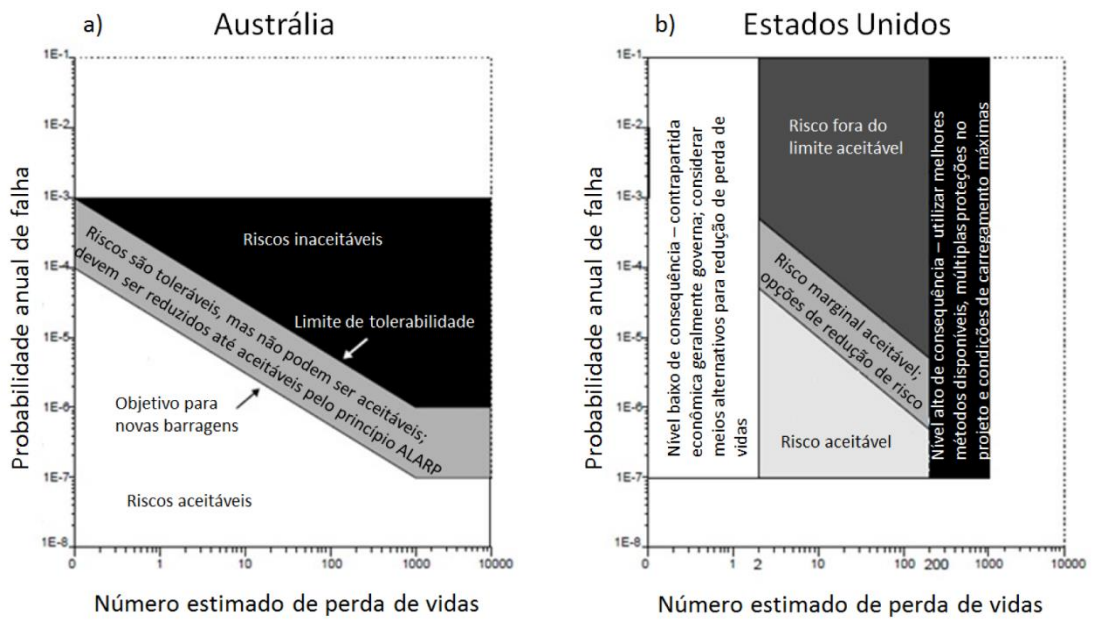


Figura 0.9 – Critérios de aceitabilidade do risco. a) Austrália (ANCOLD) e b) EUA (USBR).

Os gráficos nas figuras a seguir, mostram exemplos do *U.S. Bureau of Reclamation, U.S Army Corps of Engineers, Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD) e New South Wales Dam Safety Committee.*

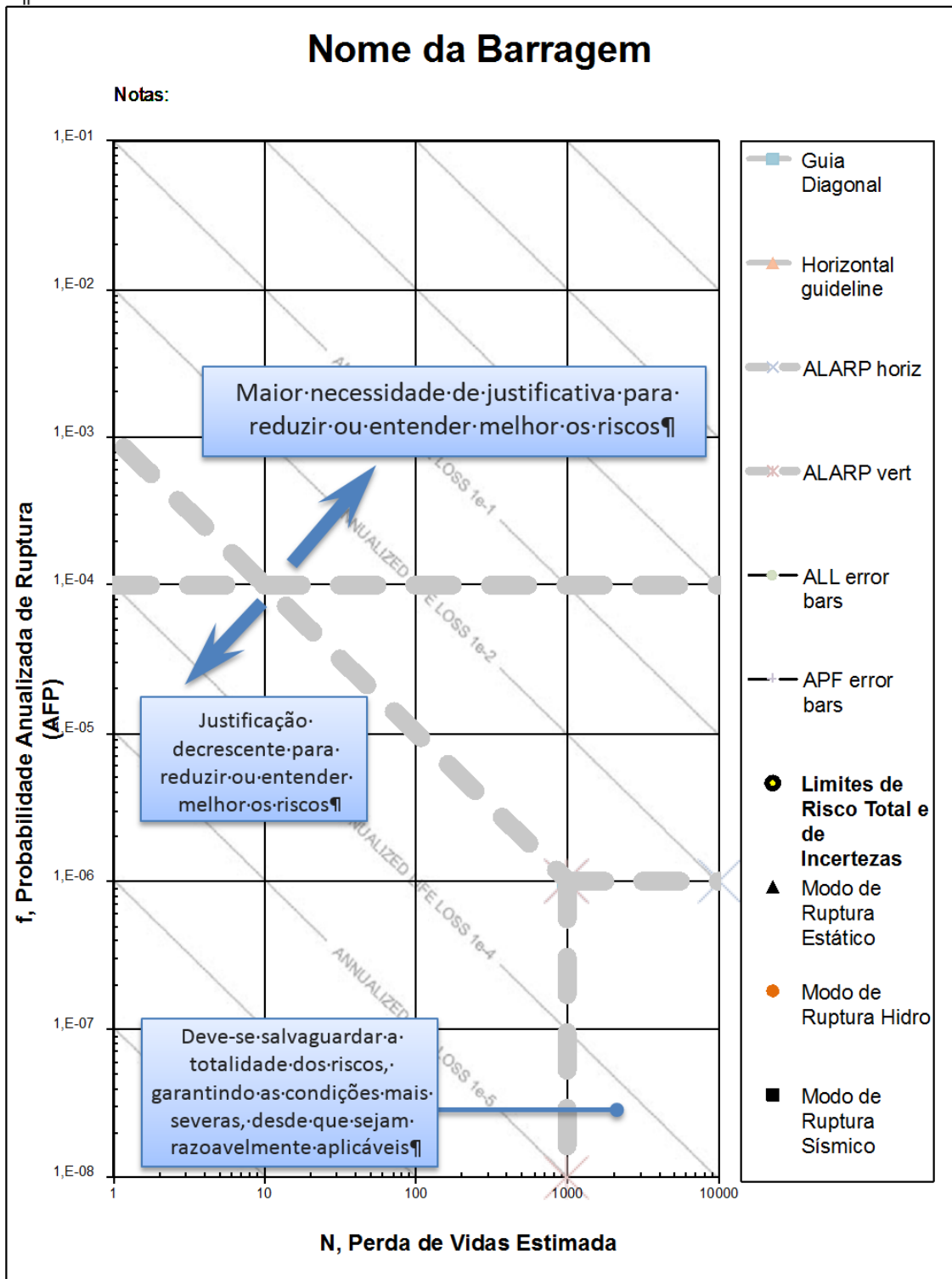


Figura 0.10 - Gráfico de avaliação de risco adotados pelo U.S Bureau of Reclamation.

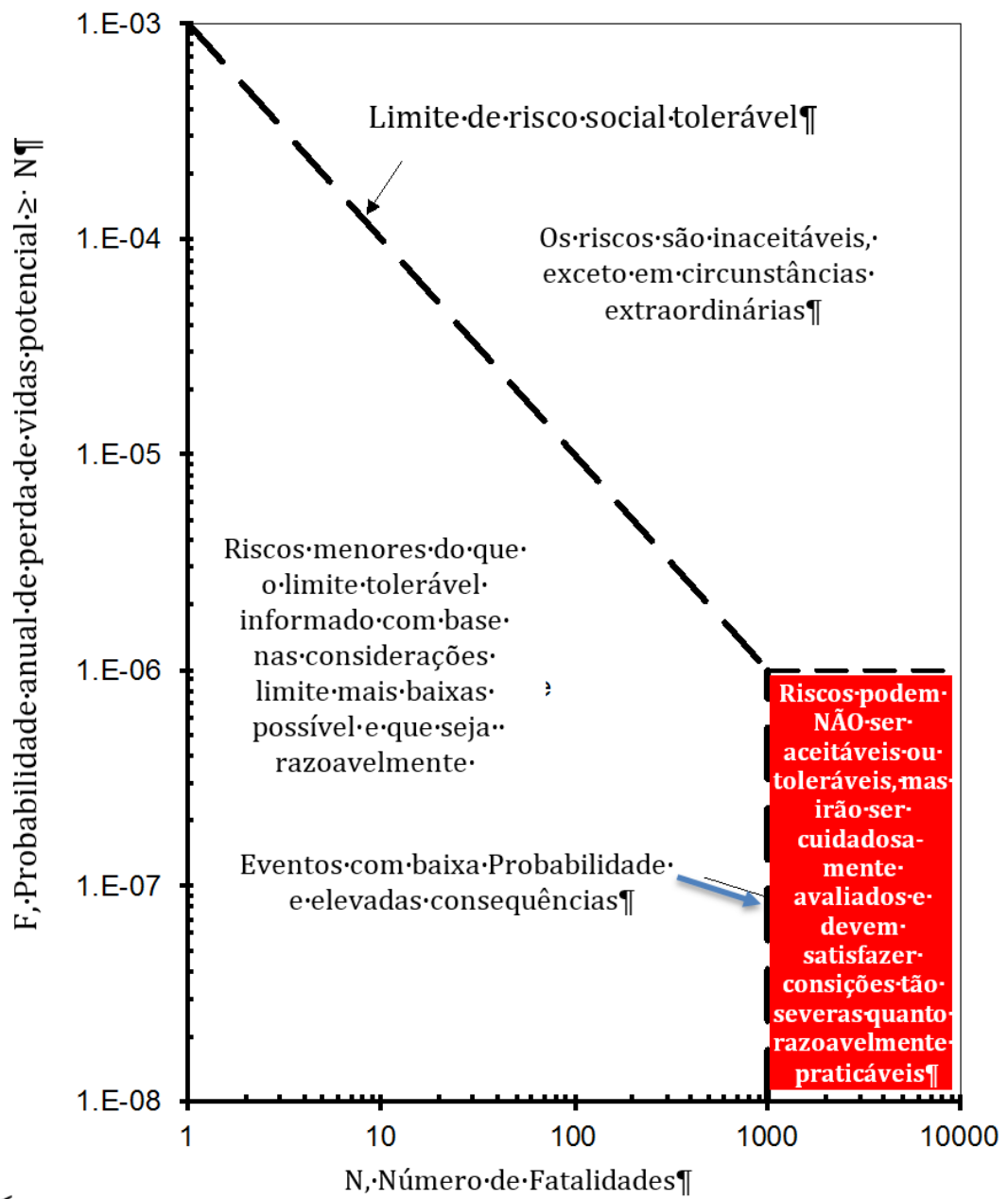


Figura 0.11 - Gráfico de avaliação de risco adotado pelo U.S. Army Corps of Engineers.

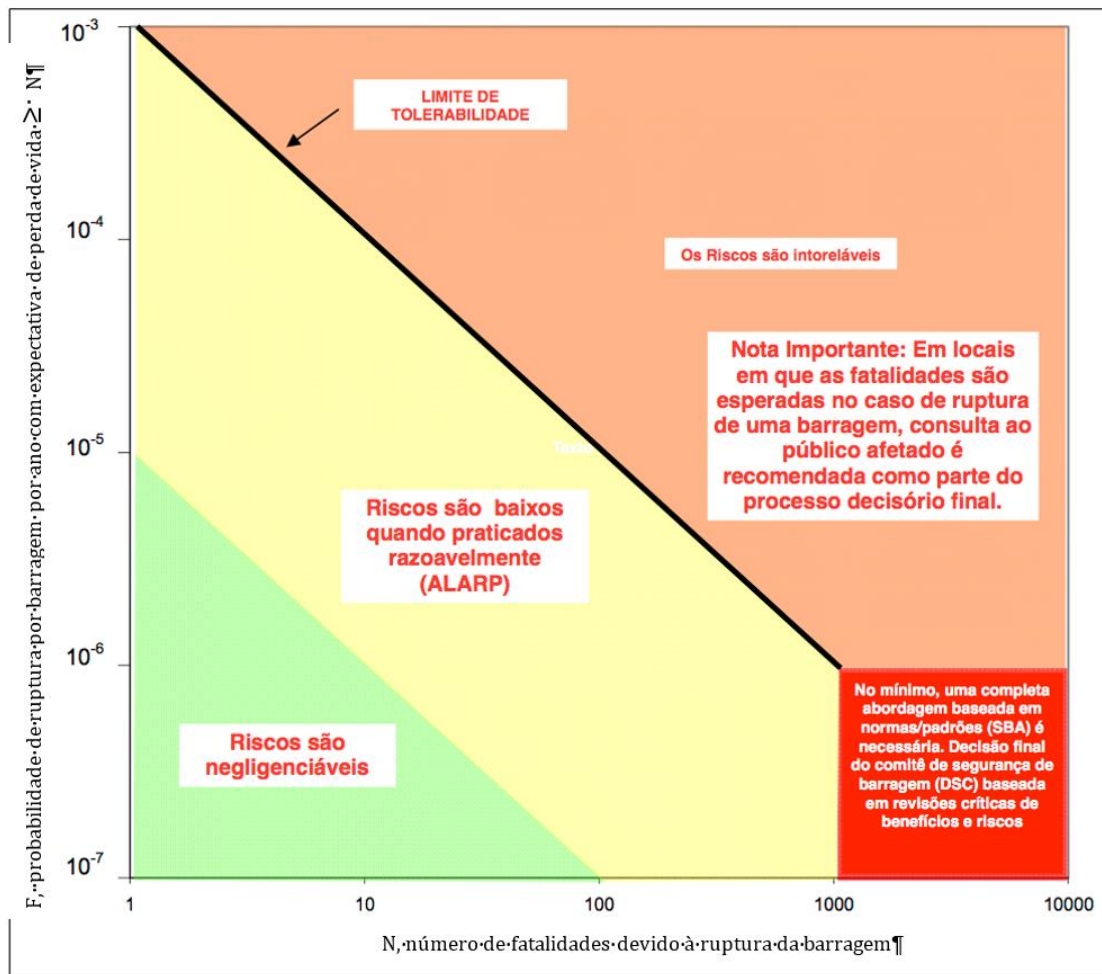


Figura 0.12 - Gráfico de avaliação de risco adotado pelo New South Wales Dam Safety Committee.

Outra forma de mensurar o risco é monetária, realizando um inventário dos atingidos, calculando os custos físicos, imagem da empresa, indenizações, desvalorização da empresa e lucro cessante.

Os riscos assumidos com o toleráveis, são aqueles em que sua redução impraticável ou os custos associados a esta redução são considerados altos em relação aos benefícios de correntes.

A Tabela 0.11 apresenta o risco aceitável por morte, proposto Gulvanessian (2002), quando um indivíduo é exposto a diferentes tipos de acidentes,

Tabela 0.11 - Risco aceitável por morte quando um indivíduo é exposto a diferentes tipos de acidentes (Gulvanessian et al.,2002, Apud Caldeira 2005)

| Acidentes | Risco (x10 ⁻⁶ p.a.) ^a | Acidentes | Risco (x10 ⁻⁶ p.a.) ^a |
|---------------------------------------|---|---|---|
| Acidentes em edifícios | | Ocupação (UK) | |
| Rotura estrutural (UK) | 0,14 | Indústrias químicas e associadas | 85 |
| Incêndio em edifícios (Austrália) | 4 | Construção naval e engenharia marítima | 105 |
| Desastres naturais (USA) | | Agricultura | 110 |
| Furacões (1901-72) | 0,4 | Indústrias de construção | 150 |
| Tomados (1953-71) | 0,4 | Ferrovias | 180 |
| Relâmpagos (1969) | 0,5 | Minas de carvão | 210 |
| Sismos (Califórnia) | 2 | Extracção | 295 |
| Acidentes em geral (USA, 1969) | | Mineração (outras) | 750 |
| Envenenamento | 20 | Actividades <i>offshore</i> de petróleo e gás | 1650 |
| Afogamento | 30 | Pesca submarina | 2800 |
| Fogos e queimaduras | 40 | Desportos (USA) | |
| Quedas | 90 | Exploração de grutas | 45 |
| Acidentes rodoviários | 300 | Voos em planador | 400 |
| Todas as causas (UK, 1977) | | Mergulho | 420 |
| Toda a população | 12000 | Asa delta | 1500 |
| Mulheres de 30 anos | 600 | Paraquedas | 1900 |
| Homens de 30 anos | 1000 | | |
| Mulheres de 60 anos | 10000 | | |
| Homens de 60 anos | 20000 | | |

^a O risco é expresso como a probabilidade de morte de uma pessoa com exposição normal durante um ano

Pimenta (2009) apresenta uma proposta de critérios para Apreciação do Risco para barragens portuguesas, na qual considera-se que:

- Limite máximo para barragens em funcionamento de 10⁻⁴ p.a. em média para a população em risco;
- Limite máximo para novas barragens de 10⁻⁵ p.a. em média para a população em risco;
- F probabilidade anual de ocorrência de N ou mais fatalidades para um dado acidente;
- N número de fatalidades;

A Figura 0.13 apresenta-se a aplicação do princípio ALARP abaixo dos limites de tolerabilidade

e de aceitabilidade (Pimenta, 2009).

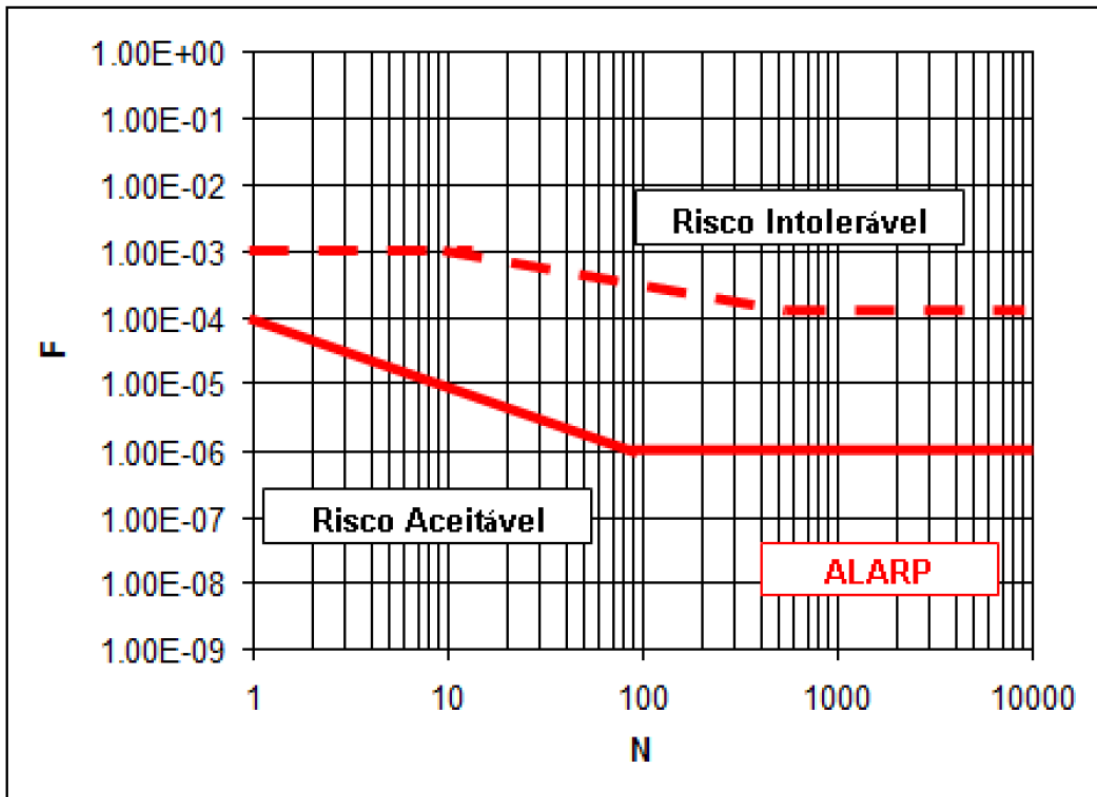


Figura 0.13 – Risco aceitável proposto pela Pimenta (2009).

Assim como nas legislações internacionais de barragens, a presente metodologia determinará o risco aceitável como sendo o produto entre a probabilidade de ruptura e a consequência, em que nessa metodologia será considerada perda de vidas, adotando-se os critérios da ANCOLD (1994).

QUINTA ETAPA - AÇÕES QUE REDUZEM O RISCO DE FALHA

A probabilidade de falha de uma barragem pode ser minimizada com uma combinação de procedimentos, tais como:

- Elaboração de projetos, seguindo critérios de dimensionamentos, tratamentos de fundações, aplicação de materiais competentes nas estruturas, controle tecnológico dos materiais e demais ações que agregam nos projetos e construção de estruturas de barragens;

- Elaboração de plano de inspeção e monitoramento. Além de coletar as informações, tratá-las, buscando identificar a situação atual de segurança da barragem;
- Elaboração de plano de manutenção da estrutura, garantindo um bom estado de conservação da mesma;
- Realizar auditorias semestrais buscando identificar melhorias para a estrutura;

Quanto às consequências, essas conseguem ser mitigadas no processo de estudo locacional de futuras estruturas.

Em 8 de agosto de 2019, após o rompimento da barragem localizada no município de Brumadinho, a ANM (Agência Nacional de Mineração) publicou a Resolução 13 que proíbe a implantação de novas estruturas conforme citação abaixo:

Art. 3º Ficam os empreendedores responsáveis por quaisquer barragens de mineração, proibidos de conceber, construir, manter e operar, nas localidades pertencentes a poligonal da área outorgada ou em áreas averbadas no respectivo título minerário e inseridos na Zona de Autossalvamento – ZAS

I - Instalações destinadas a atividades administrativas, de vivência, de saúde e de recreação;”

II - Barragens de mineração ou estruturas vinculadas ao processo operacional de mineração para armazenamento de efluentes líquidos, situadas imediatamente à jusante da barragem de mineração cuja existência possa comprometer a segurança da barragem situada à montante, conforme definido pelo projetista; e

III - Qualquer instalação, obra ou serviço que manipule, utilize ou armazene fontes radioativas.

§ 1º Para barragens de mineração novas a proibição a que se refere o inciso I

será aplicável a partir do primeiro enchimento do reservatório.

§ 2º Consideram-se áreas de vivência referenciadas no inciso I as seguintes instalações:

- a) instalações sanitárias, exceto aquelas essenciais aos trabalhadores que atuam nas áreas à jusante de barragem;*
- b) vestiário;*
- c) alojamento;*
- d) local de refeições;*
- e) cozinha;*
- f) lavanderia;*
- g) área de lazer; e*
- h) ambulatório”.*

No entanto, em estruturas já implantadas cuja região a jusante é caracterizada como alto dano potencial, principalmente com consequentes perdas de vida, a probabilidade de ocorrência de modo de falha tem que ser mitigada com ações/ medidas. A metodologia do presente estudo propõe ações conforme apresentado na Tabela 0.12.

Tabela 0.12 – Medidas para reduzir a probabilidade de ocorrer uma falha.

| RISCO | MEDIDAS |
|----------------------|---|
| INACEITÁVEIS | Implementação de medidas imediatas, reduzindo a probabilidade de ocorrência de um modo de falha ou diminuindo/ extinguindo as consequências catastróficas |
| RISCO A SER REDUZIDO | Implementação de melhorias imediata na estrutura, reduzindo a probabilidade de ocorrência de um modo de falha. |
| RISCO ACEITÁVEL | Continuar com os monitoramentos e estudos periódicos, conforme preconizados nas legislações vigentes |

SEXTA ETAPA – CLASSIFICAÇÃO DE RISCO SEGUNDO ANM

A classificação de risco aplicada pela ANM segue os quadros que constam no anexo V da portaria 70.389 da agência. A classificação é realizada somando a pontuação, conforme estabelecido no quadro abaixo (Tabela 0.13).

Tabela 0.13 – Tabela de classificação(ANM, 2017)



ANEXO V

Quadro 1 - Classificação para barragens de mineração

| | | | |
|--|--------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| NOME DA BARRAGEM: | | | |
| DATA DA CLASSIFICAÇÃO E ENQUADRAMENTO: | | | |
| 1 | | CATEGORIA DE RISCO (CRI) | PONTOS |
| 1.1 | Características Técnicas (CT) | | |
| 1.2 | Estado de Conservação (EC) | | |
| 1.3 | Plano de Segurança de Barragens (PS) | | |
| PONTUAÇÃO TOTAL (CRI) = CT + EC + PS | | | |
| CLASSIFICAÇÃO DE RISCO | | | |
| FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO | CATEGORIA DE RISCO | | CRI |
| | ALTO | | ≥ 65 ou $EC^* = 10$ (*) |
| | MÉDIO | | $37 < CRI < 65$ |
| | BAIXO | | ≤ 37 |
| (*) Pontuação (10) em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade providências imediatas pelo responsável da barragem. | | | |
| NOME EMPREENDEDOR: | | | |
| CLASSIFICAÇÃO PARA BARRAGENS DE MINERAÇÃO | | | |
| 2 | | DANO POTENCIAL ASSOCIADO (DPA) | PONTOS |
| 2.1 | Volume total do reservatório | | |
| 2.2 | Existência de População a Jusante | | |
| 2.3 | Impacto Ambiental | | |
| 2.4 | Impacto Sócio-Econômico | | |
| PONTUAÇÃO TOTAL (DPA) | | | |
| CLASSIFICAÇÃO DE DANO | | | |
| FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO | DANO POTENCIAL ASSOCIADO | | DPA |
| | ALTO | | ≥ 13 |
| | MÉDIO | | $7 < DPA < 13$ |
| | BAIXO | | ≤ 7 |
| MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO | | | |

Para a categoria denominada de risco pela ANM, são analisados três aspectos, sendo eles a característica técnica (Tabela 0.14), o estado de conservação (Tabela 0.15) e o plano de segurança de barragens (Tabela 0.16).

Tabela 0.14 – Matriz de classificação – Característica Técnica




|  Departamento Nacional de Produção Mineral | | | | |
|--|------------------------------------|--|---|--|
| MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (RESÍDUOS E REJEITOS) | | | | |
| 1.1 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS (CT) | | | | |
| Altura (a) | Comprimento (b) | Vazão de Projeto (c) | Método Construtivo (d) | Auscultação (e) |
| Altura ≤ 15m (0) | Comprimento ≤ 50m (0) | CMP (Cheia Máxima Provável) ou Decamilenar (0) | Etapa única (0) | Existe instrumentação de acordo com o projeto técnico (0) |
| 15m < Altura < 30m (1) | 50m < Comprimento < 200m (1) | Milenar (2) | Alteamento a jusante (2) | Existe instrumentação em desacordo com o projeto, porém em processo de instalação de instrumentos para adequação ao projeto (2) |
| 30m ≤ Altura ≤ 60m (4) | 200 ≤ Comprimento ≤ 600m (2) | TR = 500 anos (5) | Alteamento por linha de centro (5) | Existe instrumentação em desacordo com o projeto sem processo de instalação de instrumentos para adequação ao projeto (6) |
| Altura > 60m (7) | Comprimento > 600m (3) | TR Inferior a 500 anos ou Desconhecida/ Estudo não confiável (10) | Alteamento a montante ou desconhecido (alterado pela Resolução ANM nº 13/2013) (10) | Barragem não instrumentada em desacordo com o projeto (8) |
| CT = ∑ (a até e) | | | | |

Tabela 0.15 – Matriz de classificação – Estado de Conservação



|  Departamento Nacional de Produção Mineral | | | |
|--|---|--|--|
| QUADRO 3 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (RESÍDUOS E REJEITOS) 1.2 - ESTADO DE CONSERVAÇÃO - EC | | | |
| Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (f) | Percolação (g) | Deformações e Recalques (h) | Deterioração dos Taludes / Paramentos (i) |
| Estruturas civis bem mantidas e em operação normal /barragem sem necessidade de estruturas extravasoras (0) | Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0) | Não existem deformações e recalques com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (0) | Não existe deterioração de taludes e paramentos (0) |
| Estruturas com problemas identificados e medidas corretivas em implantação (3) | Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes e ombreiras estáveis e monitorados (3) | Existência de trincas e abatimentos com medidas corretivas em implantação (2) | Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de vegetação arbustiva (2) |
| Estruturas com problemas identificados e sem implantação das medidas corretivas necessárias (6) | Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem implantação das medidas corretivas necessárias (6) | Existência de trincas e abatimentos sem implantação das medidas corretivas necessárias (6) | Erosões superficiais, ferragem exposta, presença de vegetação arbórea, sem implantação das medidas corretivas necessárias (6) |
| Estruturas com problemas identificados, com redução de capacidade vertente e sem medidas corretivas (10) | Surgência nas áreas de jusante com carreamento de material ou com vazão crescente ou infiltração do material contido, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10) | Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10) | Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura. (10) |
| EC = \sum (f até i) | | | ▼ |

Tabela 0.16 – Matriz de classificação – Plano de Segurança




|  Departamento Nacional de Produção Mineral | | | | |
|---|---|--|--|--|
| QUADRO 4 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (RESÍDUOS E REJEITOS) 1.3 - PLANO DE SEGURANÇA DA BARRAGEM - OS | | | | |
| Documentação de Projeto (j) | Estrutura Organizacional e Qualificação dos Profissionais na Equipe de Segurança da Barragem (k) | Manuais de Procedimentos para Inspeções de Segurança e Monitoramento (l) | Plano de Ação Emergencial - PAE (quando exigido pelo órgão fiscalizador) (m) | Relatórios de inspeção e monitoramento da instrumentação e de Análise de Segurança (n) |
| Projeto executivo e "como construído" (0) | Possui unidade administrativa com profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem (0) | Possui manuais de procedimentos para inspeção, monitoramento e operação (0) | Possui PAE (0) | Emite regularmente relatórios de inspeção e monitoramento com base na instrumentação e de Análise de Segurança (0) |
| Projeto executivo ou "como construído" (2) | Possui profissional técnico qualificado (próprio ou contratado) responsável pela segurança da barragem (1) | Possui apenas manual de procedimentos de monitoramento (2) | Não possui PAE (não é exigido pelo órgão fiscalizador) (2) | Emite regularmente apenas relatórios de Análise de Segurança (2) |
| Projeto "como está" (3) | Possui unidade administrativa sem profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem (3) | Possui apenas manual de procedimentos de inspeção (4) | PAE em elaboração (4) | Emite regularmente apenas relatórios de inspeção e monitoramento (4) |
| Projeto básico (5) | Não possui unidade administrativa e responsável técnico qualificado pela segurança da barragem (6) | Não possui manuais ou procedimentos formais para monitoramento e inspeções (8) | Não possui PAE (quando for exigido pelo órgão fiscalizador) (8) | Emite regularmente apenas relatórios de inspeção visual (6) |
| Projeto conceitual (8) | - | - | - | Não emite regularmente relatórios de inspeção e monitoramento e de Análise de Segurança (8) |
| Não há documentação de projeto (10) | - | - | - | - |
| PS = \sum (j até n) | | | | |

O dano potencial associado é mensurado de acordo com a matriz apresentada na

Tabela 0.17 – Matriz de classificação – Dano potencial associado



|  Departamento Nacional de Produção Mineral | | | |
|--|--|--|--|
| QUADRO 5 - CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO - DPA (RESÍDUOS E REJEITOS) | | | |
| Volume Total do Reservatório (a) | Existência de população a jusante (b) | Impacto ambiental (c) | Impacto sócio-econômico (d) |
| Muito Pequeno < = 500 mil m ³ (1) | INEXISTENTE (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área afetada a jusante da barragem) (0) | INSIGNIFICANTE (área afetada a jusante da barragem encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais e a estrutura armazena apenas resíduos Classe II B – Inertes , segundo a NBR 10.004 da ABNT) (0) | INEXISTENTE (não existem quaisquer instalações na área afetada a jusante da barragem) (0) |
| Pequeno 500 mil a 5 milhões m ³ (2) | POUCO FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (3) | POUCO SIGNIFICATIVO (área afetada a jusante da barragem não apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos Classe II B – Inertes , segundo a NBR 10.004 da ABNT) (2) | BAIXO (existe pequena concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância sócio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (1) |
| Médio 5 milhões a 25 milhões m ³ (3) | FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal ou estadual ou federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas) (5) | SIGNIFICATIVO (área afetada a jusante da barragem apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos Classe II B – Inertes , segundo a NBR 10.004 da ABNT) (6) | MÉDIO (existe moderada concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância sócio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (3) |
| Grande 25 milhões a 50 milhões m ³ (4) | EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas) (10) | MUITO SIGNIFICATIVO (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe II A - Não Inertes, segundo a NBR 10004 da ABNT) (8) | ALTO (existe alta concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância sócio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (5) |
| Muito Grande > = 50 milhões m ³ (5) | - | MUITO SIGNIFICATIVO AGRAVADO (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe I- Perigosos segundo a NBR 10004 da ABNT) (10) | - |
| DPA= ∑ (a até d) | | | |

Após mensurar a pontuação da categoria de risco e do dano potencial associado, a classificação é realizada conforme Tabela 0.18.

Tabela 0.18 – Classificação da barragem – Critério ANM.

| | DANO POTENCIAL ASSOCIADO | | |
|---------------------------|---------------------------------|--------------|--------------|
| CATEGORIA DE RISCO | ALTO | MÉDIO | BAIXO |
| ALTO | A | B | C |
| MÉDIO | B | C | D |
| BAIXO | B | C | E |

Nestes estudos iremos apresentar as classificações de cada barragem estuda no quadro de descrição das estruturas.

CAPÍTULO 4

ESTUDO DE CASO

A seguir serão apresentados estudos de casos em barragens de mineração, classificando-as quanto ao risco aceitável e propondo ações para mitigar os riscos inaceitáveis.

BARRAGEM A

DESCRIÇÃO DA BARRAGEM

A Barragem A tem como finalidade a contenção dos sedimentos gerados por uma pilha de disposição de estéril (PDE) A, localizada a montante.

A Barragem A foi construída em etapa única, em solo compactado, com filtro vertical, dreno de pé em enrocamento e tapete horizontal. Este último foi formado por um colchão drenante simples nas ombreiras, e por um tapete “sanduíche”, no fundo do talvegue.

A Barragem A possui 33,0 m de altura, com crista na El. 1.201,00 m e 200,0 m de comprimento. Os taludes de jusante e montante apresentam inclinação de 1V:2H, conforme apresentado na seção típica ilustrada na Figura 0.14.

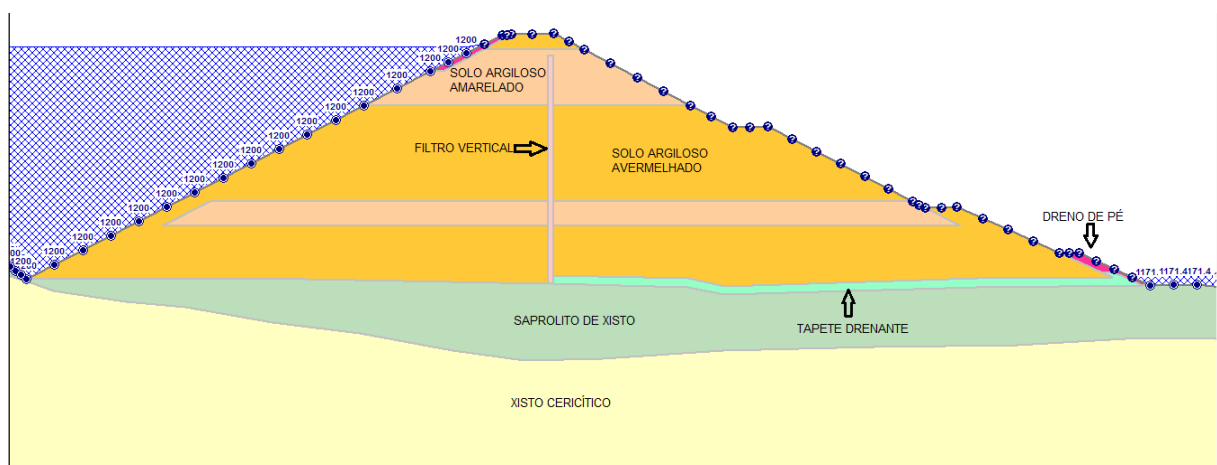


Figura 0.14 - Seção típica - Projeto *As Built* da Barragem A.

Na Tabela 0.19 é apresentada a ficha técnica da Barragem A, incluindo suas principais características.

Tabela 0.19 - Ficha Técnica da Barragem A.

| DADOS GERAIS | | | |
|--|--|----------------------------|------|
| Nome da Estrutura: | Barragem A | | |
| Classificação: | Classe B da ANM | | |
| Finalidade: | Sedimentos | | |
| Início de Operação: | 2017 | Final de Vida Útil: | 2020 |
| Tipo de Seção: | Homogênea | | |
| Tipo de Fundação: | A fundação na região do talvegue no eixo do barramento foi caracterizada por uma camada de solo aluvionar, nos primeiros 4,0m, caracterizado como areno siltooso, com SPT variando entre 4 e 8 golpes (o material de baixa resistência foi removido durante tratamento de fundação), sobreposto ao solo residual jovem (saprolítico) classificado como material silto argiloso e com pouca areia fina com índices N_{SPT} variando entre 30 e 51 golpes. A partir dos 8,3m de profundidade até atingir 12,4m foi encontrado o saprólito de metadiamicrito, silto argiloso e de cor variegada. Por fim, até o final do furo foi encontrado o metadiamicrito cuja resistência varia de branda até resistente, apresentando-se desde alta a moderadamente alterada e com fraturamento variando entre pouco e muito fraturado. | | |
| Volume Atual do Reservatório (m³): | 410.000 | | |
| Elevação Atual da Crista (m): | 1.201,00 | | |
| Comprimento da Crista (m): | 210 | | |
| Altura Máxima Atual (m): | 33 | | |
| Drenagem Interna: | Dreno vertical, tapete drenante e dreno de pé. | | |
| Drenagem Superficial: | Canaletas de berma e canais periféricos nas ombreiras do barramento. | | |
| Vertedouro de Fechamento | Vertedouro retangular em concreto. | | |

CÁLCULO DA PROBABILIDADE DOS MODOS DE FALHAS

- MODO DE FALHA GALGAMENTO

O sistema hidrológico da barragem A é composto pelo reservatório da barragem e sua bacia de contribuição.

A Barragem A apresenta volume de amortecimento de cheia atual de 124.769 m³, entre a crista e a soleira do sistema extravasor, conforme apresentado na Tabela 0.20 e Figura 0.15.

Tabela 0.20 - Curvas cota-volume da barragem A.

| Trânsito de cheias | | |
|--------------------|------------------------|--------------------------|
| Cota (m) | Área (m ²) | Volume (m ³) |
| 1.198,00 | 37.456,00 | 0,00 |
| 1.198,50 | 38.781,00 | 19.059,21 |
| 1.199,00 | 40.106,00 | 38.780,92 |
| 1.199,50 | 41.590,50 | 59.205,00 |
| 1.200,00 | 43.075,00 | 80.371,34 |
| 1.200,50 | 44.398,50 | 102.239,68 |
| 1.201,00 | 45.722,00 | 124.769,77 |

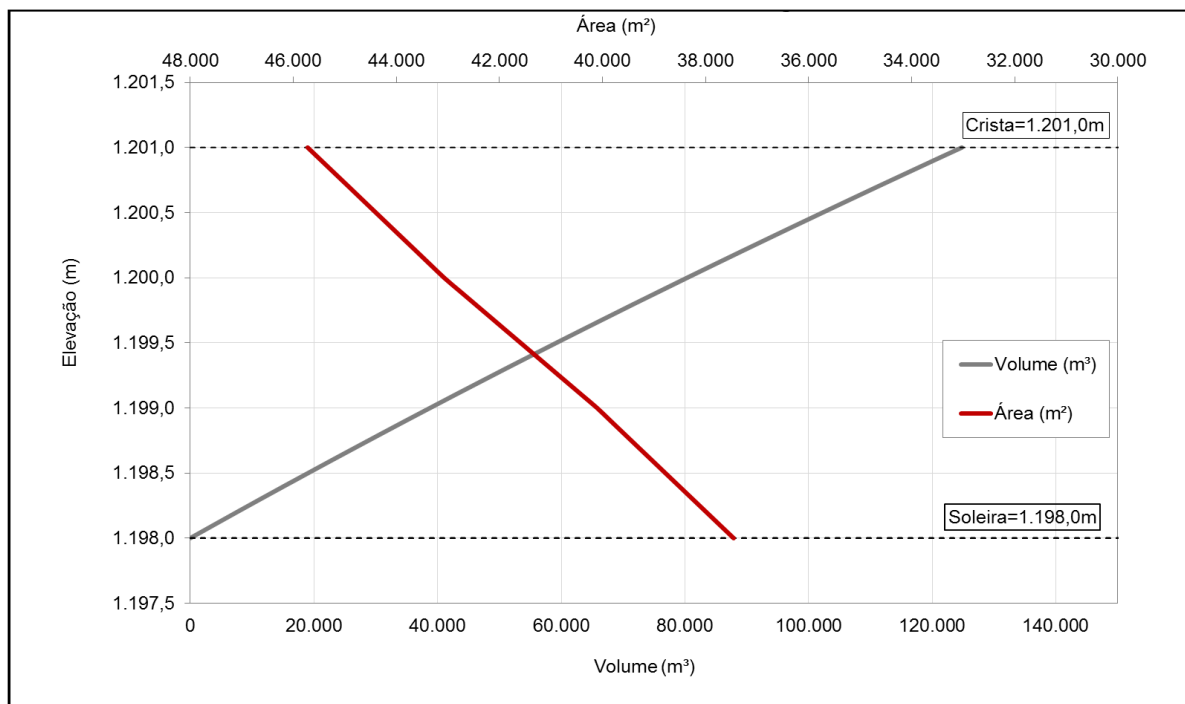


Figura 0.15 - Curva cota-volume do reservatório da barragem A.

Para verificação da capacidade de vertimento do sistema extravasor da barragem A, frente a cheias extremas, considerou-se a vazão de descarga dos sistemas extravasores existentes a montante da Barragem A. Na Figura 0.16 é apresentada a vazão máxima de descarga da estrutura.

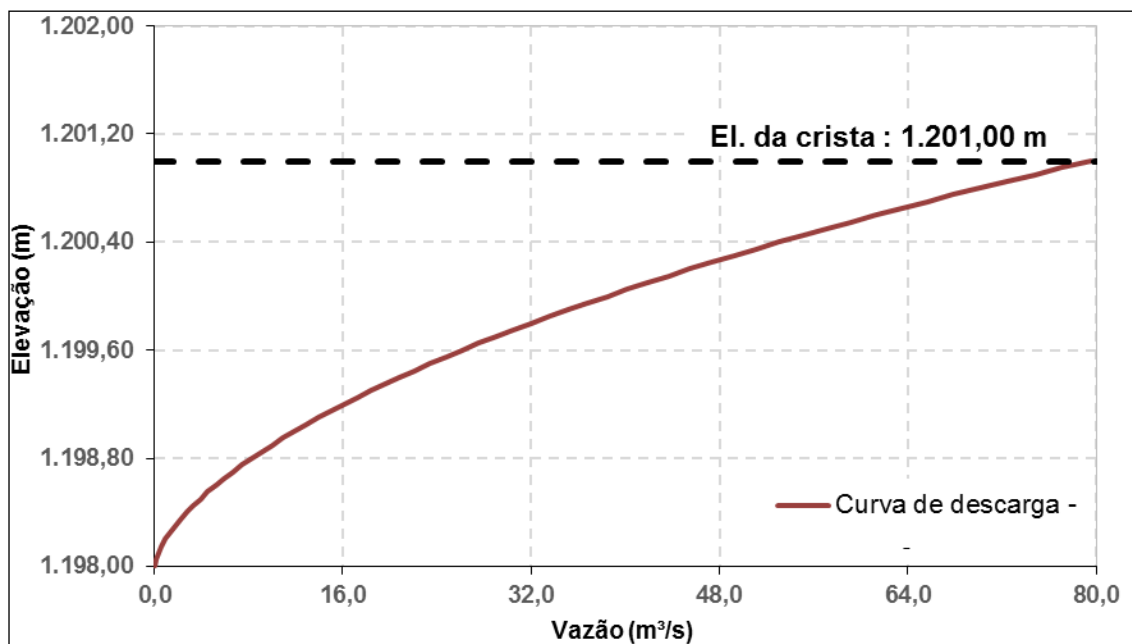


Figura 0.16 - - Curva de descarga do sistema extravasor da barragem A.

O sistema extravasor da Barragem A é constituído de um vertedouro de soleira livre (El. 1.198,00 m) com seção retangular conformada em concreto formando um canal com 66,84 m de extensão, seguido de um canal rápido em degrau conformado em concreto, a ser implantado junto à ombreira direita da barragem. O canal que funciona como o vertedouro possui inclinação de 0,5 %, enquanto o rápido possui inclinações variáveis ao longo do seu comprimento, gerando um desnível final de 29,20 m.

A simulação do sistema hidrológico foi realizada com os parâmetros e métodos apresentados para todas as durações de chuvas e tempos de retorno considerados. Com isso, procurou-se identificar a duração crítica do sistema, ou seja, a duração do evento pluviométrico responsável pela ocorrência do galgamento do maciço ou pela maior sobrelevação do nível d'água no reservatório.

A Tabela 0.21 e a Figura 0.17 apresentam os resultados da simulação hidrológica decorrente da passagem da Cheia Máxima Provável (CMP) pelo reservatório da Barragem A.

Tabela 0.21 - Resultados do trânsito de cheias no reservatório da Barragem A.

| TR | Duração crítica (horas) | Vazão afluente (m ³ /s) | Vazão defluente (m ³ /s) | NA máx (m) | Borda livre (m) |
|---------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------|-----------------|
| 500 | 6 | 21,72 | 16,95 | 1199,4 | 1,6 |
| 1.000 | 6 | 24,42 | 19,26 | 1199,53 | 1,47 |
| 10.000 | 4 | 37,31 | 28,07 | 1199,96 | 1,04 |
| 30.000 | 4 | 44,84 | 36,61 | 1200,26 | 0,74 |
| 50.000 | 4 | 47,58 | 36,96 | 1200,36 | 0,64 |
| 80.000 | 4 | 52,11 | 37,83 | 1200,4 | 0,6 |
| 100.000 | 4 | 51,37 | 40,21 | 1200,5 | 0,5 |
| PMP | 4 | 62,26 | 49,67 | 1200,87 | 0,13 |

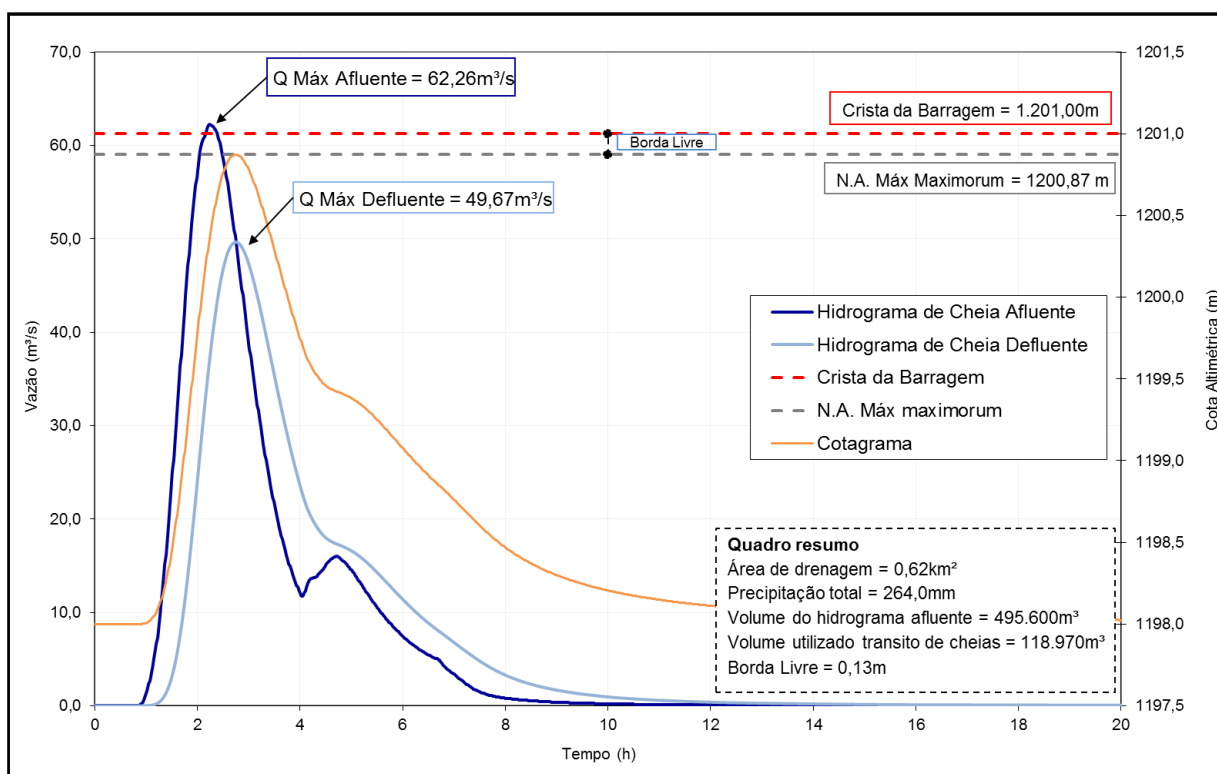


Figura 0.17 - Resultados do trânsito de cheias no reservatório da barragem A (PMP e duração crítica de 4 horas).

Os estudos indicaram que não há galgamento da estrutura nestas condições, com borda livre de 0,13m.

Percebe-se, a partir dos resultados, que a capacidade máxima do extravasor da barragem A é superior à maior vazão afluente observada, referente à PMP. Dessa forma, ainda que todo o volume da barragem seja ocupado, não ocorrerá galgamento da estrutura. Nesse caso, as diretrizes metodológicas estabelecem que a probabilidade de ruptura é desprezível, ou seja, será

considerada igual a 1×10^{-8} .

- MODO DE FALHA INSTABILIZAÇÃO
- DEFINIÇÃO DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO E REALIZAÇÃO DE ANÁLISE DETERMINÍSTICA;

A geometria utilizada para as análises de estabilidade é apresentada na Figura 0.18, correspondente à seção principal da barragem, ou seja, a seção transversal de máxima altura, obtida no Projeto *As Built*.

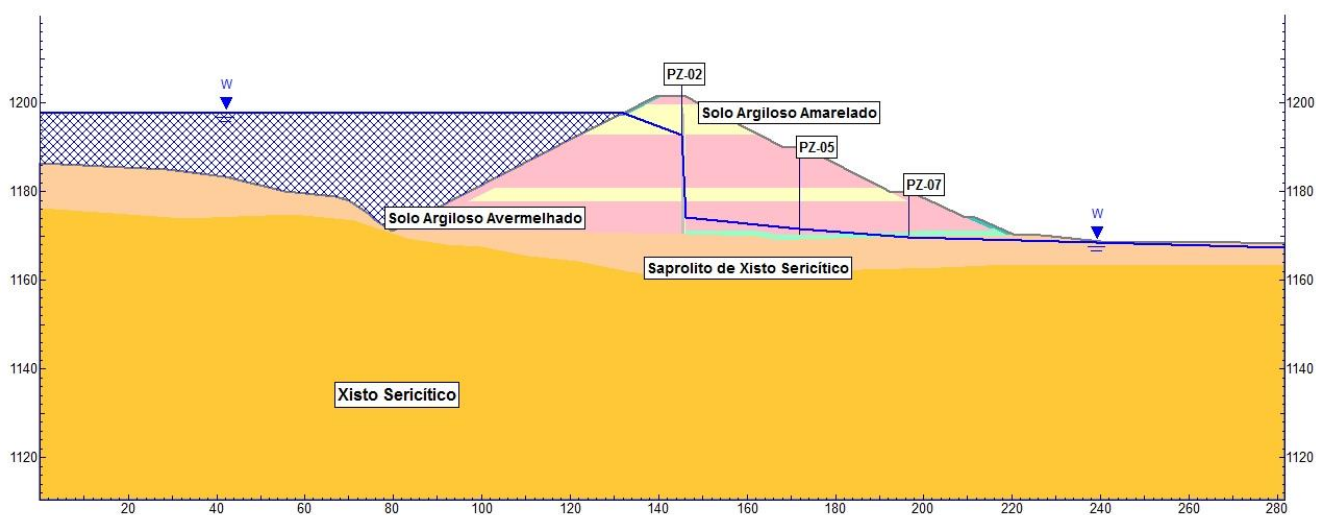


Figura 0.18 - Modelo para as análises de estabilidade – Freática atual.

- PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

Os parâmetros para os materiais que compõem o modelo foram determinados com base na média nos ensaios de laboratórios realizados durante a execução das obras e, também, durante a elaboração do projeto detalhado (Tabela 0.22).

Tabela 0.22 – Parâmetros Médios.

| Materiais | Peso Específico (kN/m ³) | Coesão Efetiva (kPa) | Ângulo de Atrito Efetivo (°) |
|-------------------------------|--------------------------------------|----------------------|------------------------------|
| Solo argiloso amarelado | 18,9 | 23,9 | 31,9 |
| Solo argiloso avermelhado | 19 | 20,5 | 35,4 |
| Saprólito de xisto sericítico | 23 | 5,35 | 35,6 |
| Xisto sericítico | 23 | 27 | 37 |
| Filtro vertical (areia) | 20 | 0 | 32 |
| Tapete drenante (brita 0) | 22 | 0 | 35 |
| Dreno de pé (enrocamento) | 23 | 0 | 45 |

- **NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS**

Para o modo de falha instabilização serão realizados estudos de dois cenários distintos, sendo eles:

- **Cenário 1:** condição normal de operação.

Reservatório com nível d'água na soleira do vertedouro da barragem (El. 1.197,8m), após a finalização do seu enchimento.

- **Cenário 2:** condição crítica hipotética.

Reservatório com nível d'água na soleira do vertedouro da barragem (El. 1.197,8m), com níveis piezométricos críticos no maciço. A piezometria foi arbitrada, de forma a representar condições críticas de poropressão causadas pela elevação do nível do reservatório ou por um possível mau funcionamento do sistema de drenagem interna. Este mau funcionamento pode ser justificado pela presença de material susceptível à sufusão na composição do aterro compactado, que poderiam causar a colmatação da interface solo/filtro vertical. Além desta colmatação, em função da presença de caminho preferencial na ombreira direita, evidenciado pela existência de surgência de água, pode ocorrer elevação da poropressão no talude de jusante.

A definição dos níveis piezométricos para a realização das análises de estabilidade, do cenário 1, foi baseada na análise do monitoramento da barragem. Como premissa, foram utilizadas as leituras máximas de cada instrumento para definir a freática nessa condição atual.

- ANÁLISES DE ESTABILIDADE DETERMINÍSTICAS

As análises de estabilidade da Barragem A foram realizadas em condições de mobilização de resistências drenadas, considerando 02 cenários (**Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) que se diferenciam pela condição do nível freático no interior do maciço. A definição dos materiais e parâmetros condicionantes para a segurança da estrutura foi obtida na análise de estabilidade. Nota-se que em todas as análises os materiais críticos (interceptado pelo círculo de ruptura) foram os aterros e o solo saprolítico.

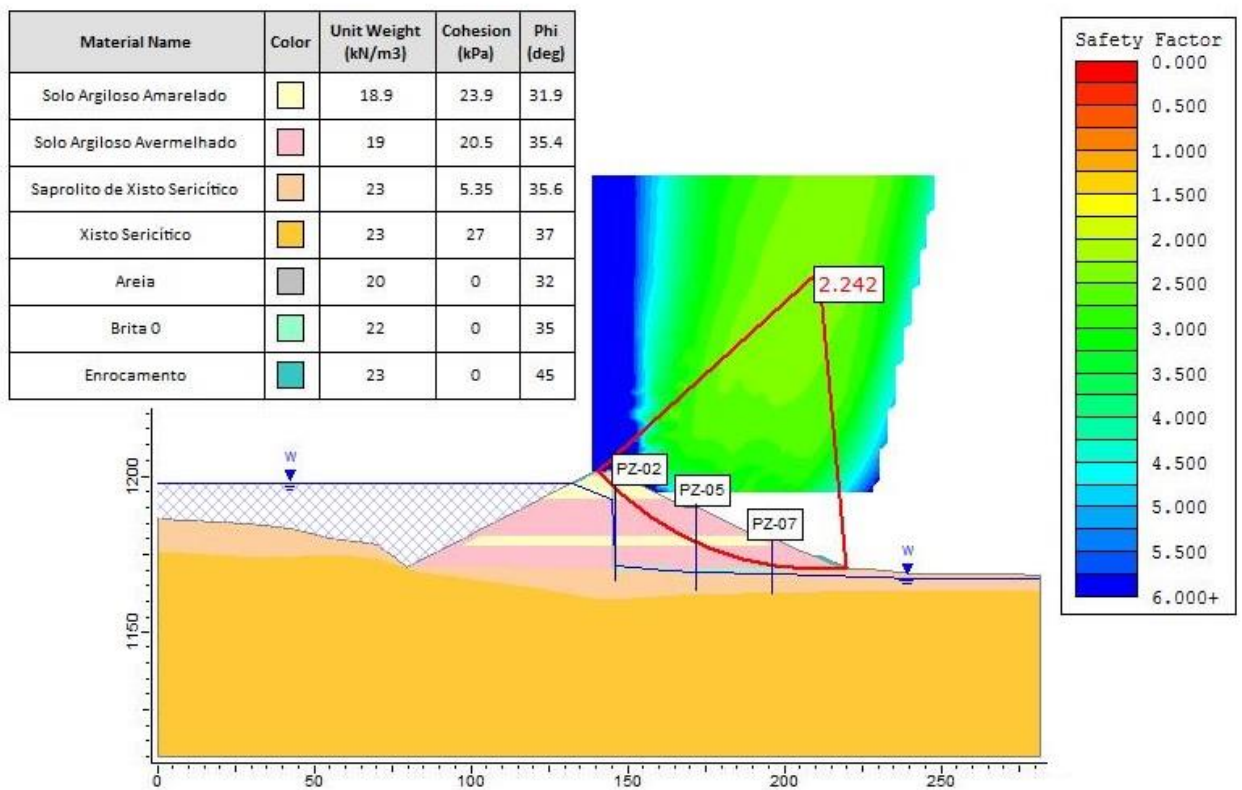


Figura 0.19 - Resultado da Análise de estabilidade determinística na Cenário 2 – Condição Normal de Operação.

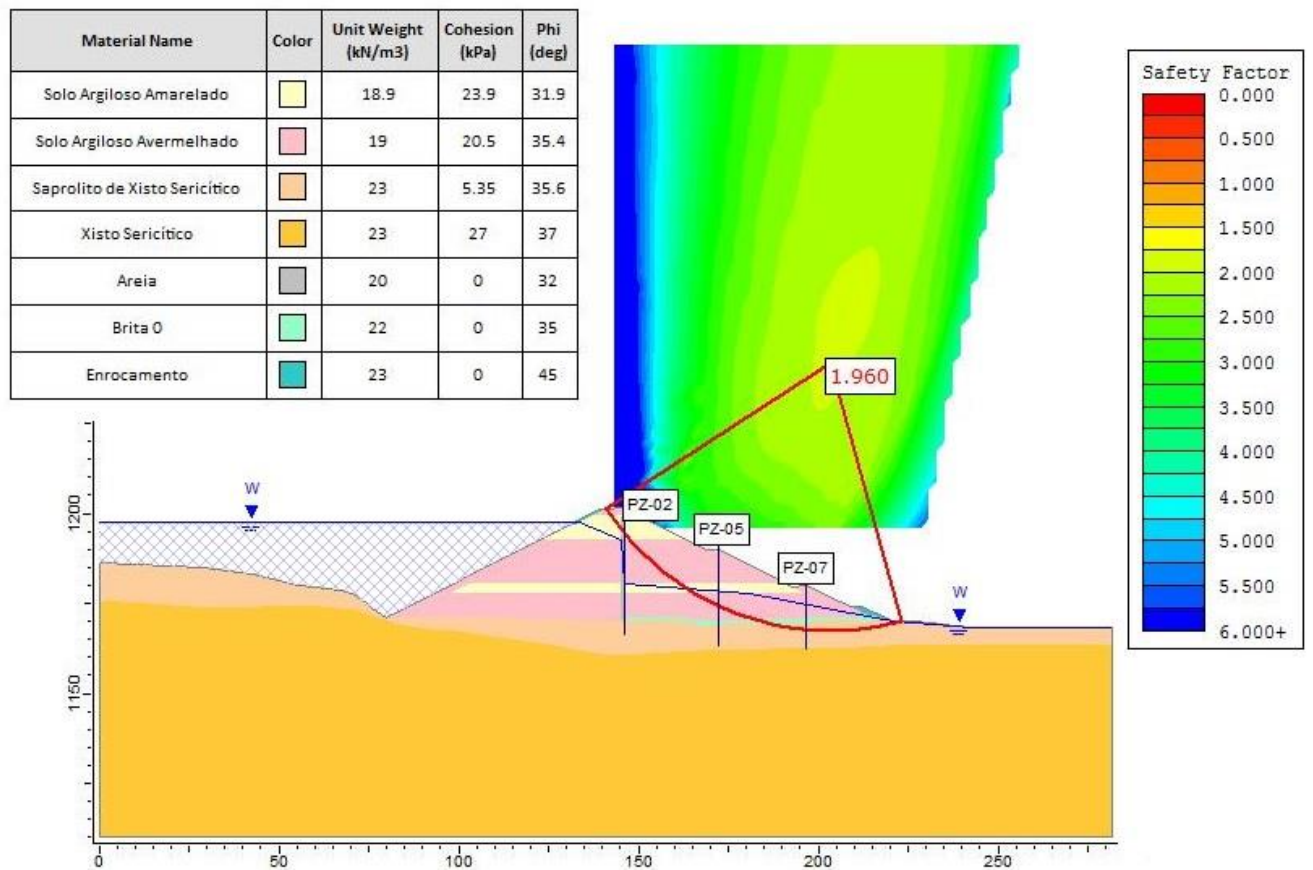


Figura 0.20 - Resultado da Análise de estabilidade determinística na Cenário 2 – Condição Crítica

- VARIABILIDADE DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS

Conforme apresentado no item anterior, em todas as análises, os materiais críticos (interceptados pelo círculo de ruptura) foram os aterros e o solo saprolítico. Para estes materiais, realizou-se uma análise estatística dos resultados de ensaios laboratoriais existentes, obtendo-se os valores médios (μ) e desvios-padrão (σ) apresentados na Tabela 0.23. Para os demais materiais, foram adotados os mesmos valores médios obtidos nos ensaios de laboratório executados em amostras indeformadas coletadas durante o projeto e a obra.

Tabela 0.23 – Variabilidade dos parâmetros geotécnicos.

| MATERIAIS | γ (kN/m ³) | c' (kPa) | Φ' (°) |
|---|-------------------------------|----------------------|----------------------|
| Solo Argiloso Amarelado ⁽¹⁾ | $\mu = 18,9$ | $\mu = 23,9^{(1)}$ | $\mu = 31,9^{(1)}$ |
| | $\sigma = 0,2^{(1)}$ | $\sigma = 9,6^{(1)}$ | $\sigma = 3,2^{(1)}$ |
| | CV = 0,9% | CV = 40,0% | CV = 10,0% |
| | (distr. Normal) | (distr. Log-normal) | (distr. Normal) |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Solo Argiloso Avermelhado (2) | $\mu = 19,0$ $\sigma = 0,57^{(1)}$ CV = 3,0% (distr. Normal) | $\mu = 20,5^{(2)}$ $\sigma = 7,2^{(2)}$ CV:35,1% (distr. Log-normal) | $\mu = 35,4^{(2)}$ $\sigma = 5,0^{(2)}$ CV:14,3% (distr. Normal) |
| Saprolito de Xisto Sericítico (3) | $\mu = 23,0$ $\sigma = -$ CV = - (distr. Normal) | $\mu = 5,35$ $\sigma = 1,6$ CV:30,0% (distr. Log-normal) | $\mu = 35,6$ $\sigma = 3,6$ CV = 10,0% (distr. Normal) |
| Xisto Sericítico | $\mu = 23,0$ | $\mu = 26,8$ | $\mu = 35,6$ |
| Filtro Vertical (Areia) | $\mu = 20,0$ | $\mu = 0,0$ | $\mu = 32,0$ |
| Tapete Drenante (Brita 0) | $\mu = 22,0$ | $\mu = 0,0$ | $\mu = 35,0$ |
| Dreno de Pé (Enrocamento) | $\mu = 23,0$ | $\mu = 0,0$ | $\mu = 45,0$ |

As variáveis aleatórias foram definidas considerando 01 amostra indeformada do aterro experimental (solo amarelado), 03 amostras deformadas da área de empréstimo (solo avermelhado), 01 amostras indeformadas da fundação (coletada durante a obra). Além dessas amostras, também foram executadas 08 sondagens na fundação da Barragem A, que adicionalmente foram utilizadas nesse tratamento estatístico.

Os parâmetros foram obtidos por meio de média aritmética dos resultados dos ensaios triaxiais dessas três amostras, conforme apresentado na Tabela 0.24 e Tabela 0.25.

Tabela 0.24 - Parâmetros do solo avermelhado.

| Amostra | c' | ϕ' (°) |
|-------------------------------------|-------|-------------|
| | (kPa) | |
| PI01 | 9,7 | 41,3 |
| PI02 | 28,8 | 37 |
| PI03 | 23 | 27,8 |
| u (média) | 20,5 | 35,4 |
| σ (desvio) | 7,2 | 5,04 |
| CV (%) | 35,1 | 14,3 |

Tabela 0.25 – Parâmetros do solo amarelado.

| Amostra | c' | ϕ' (°) |
|-------------------------------------|-------|-------------|
| | (kPa) | |
| 10304 | 23,9 | 31,9 |
| u (média) | 23,9 | 31,9 |
| σ (desvio) | 9,6 | 3,2 |
| CV (%) | 40 | 10 |

Os parâmetros da fundação estão apresentados na Tabela 0.26.

Tabela 0.26 – Parâmetros do Saprolito de Xisto Sericítico.

| Amostra | c' | ϕ' (°) |
|-------------------------------------|-------|-------------|
| | (kPa) | |
| 10180 | 5,35 | 35,6 |
| u (média) | 5,35 | 35,6 |
| σ (desvio) | 1,6 | 3,6 |
| CV (%) | 30 | 10 |

- MÉTODO DE FOSM

No método FOSM foram realizadas sete análises considerando-se, para os parâmetros geotécnicos (ângulo de atrito efetivo e coesão efetiva), os valores médios e os desvios-padrão apresentados na Tabela 0.23.

As análises de estabilidade, bem como os respectivos fatores de segurança obtidos, são apresentados na Figura 0.21, Figura 0.22, Figura 0.23, Figura 0.24, Figura 0.25, Figura 0.26, Figura 0.27, Figura 0.28, Figura 0.29, Figura 0.30, Figura 0.31, Figura 0.32 e Figura 0.33. Na Tabela 0.28 são apresentados os parâmetros de cada material utilizados nas análises. Na Tabela 0.27 são apresentadas as contribuições de cada parâmetro e de cada material nas análises de estabilidade.

Tabela 0.27 - Parâmetros utilizados e resultados das análises de estabilidade.

| Material | Parâmetro Analisado | Parâmetro Utilizado | F.S | dX_i | dFS_i | dFS_i/dX_i | $V[X_i]$ | $(dFS_i/dX_i)^2 \times V[X_i]$ | Contribuição | |
|------------------|--------------------------|-------------------------------|------|--------|---------|--------------|----------|--------------------------------|--------------|--------|
| Solo Amarelado | Coesão efetiva | $\gamma = 18,9 \text{KN/m}^3$ | 2,26 | 2,4 | - | 0,02 | -0,0084 | 5,71 | 0,0004 | 1,10% |
| | | $c' = 26,29$ | | | | | | | | |
| | | $\phi' = 31,9$ | | | | | | | | |
| | Ângulo de atrito efetivo | $\gamma = 18,9 \text{KN/m}^3$ | 2,28 | 3,2 | - | 0,04 | -0,0129 | 10,18 | 0,0017 | 4,70% |
| | | $c' = 23,90$ | | | | | | | | |
| | | $\phi' = 35,09$ | | | | | | | | |
| Solo Avermelhado | Coesão efetiva | $\gamma = 19 \text{KN/m}^3$ | 2,28 | 2,1 | - | 0,04 | -0,0171 | 4,2 | 0,0012 | 3,50% |
| | | $c' = 22,55$ | | | | | | | | |
| | | $\phi' = 35,4$ | | | | | | | | |
| | Ângulo de atrito efetivo | $\gamma = 19$ | 2,42 | 3,5 | - | 0,18 | -0,0506 | 12,53 | 0,032 | 90,50% |
| | | $c' = 20,5$ | | | | | | | | |
| | | $\phi' = 38,94$ | | | | | | | | |
| Solo saprolítico | Coesão efetiva | $\gamma = 23,0 \text{KN/m}^3$ | 2,24 | 0,5 | 0 | -0,0056 | 0,29 | 0 | 0,00% | |
| | | $c' = 5,89 \text{KN/m}^2$ | | | | | | | | |
| | | $\phi' = 35,60$ | | | | | | | | |
| | Ângulo de atrito efetivo | $\gamma = 23,0 \text{KN/m}^3$ | 2,25 | 3,6 | - | 0,01 | -0,002 | 12,67 | 0 | 0,10% |
| | | $c' = 5,35$ | | | | | | | | |
| | | $\phi' = 39,16^\circ$ | | | | | | | | |

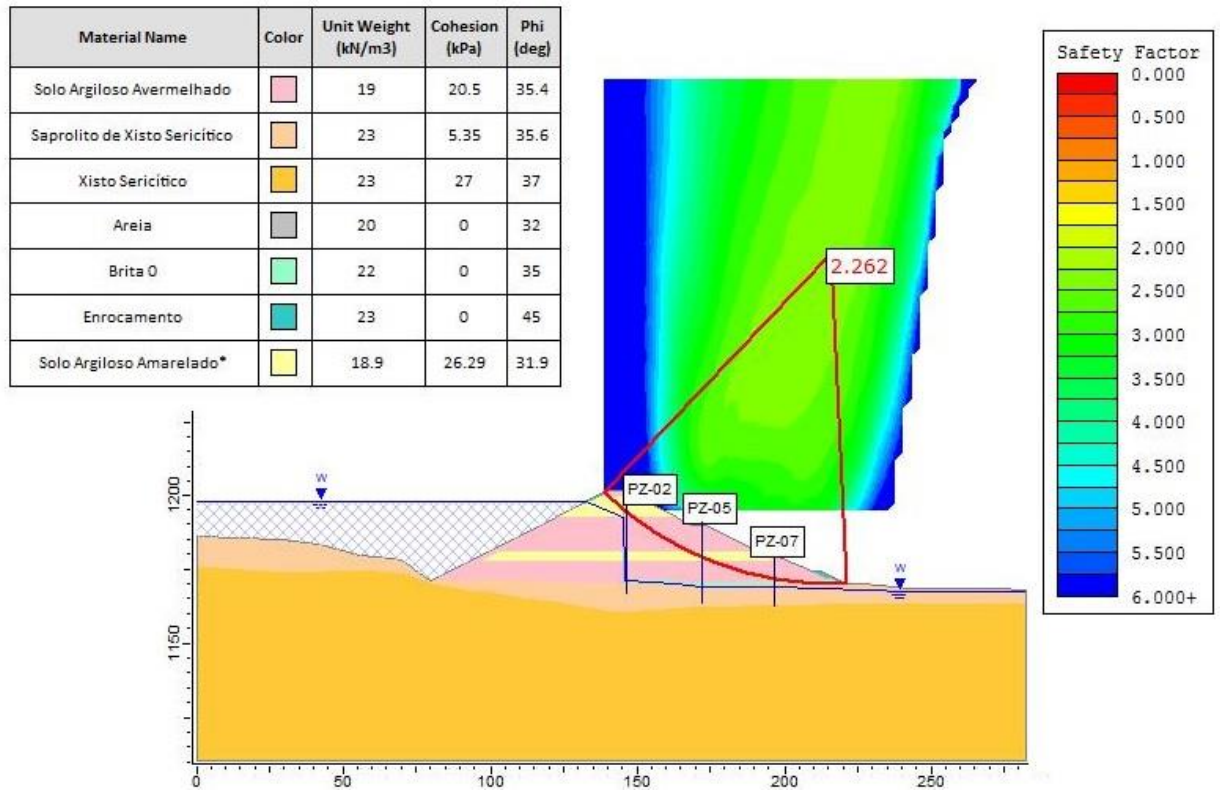


Figura 0.21 – Análise de Estabilidade – Variação a Coesão do solo amarelado – Cenário 1 e 2.

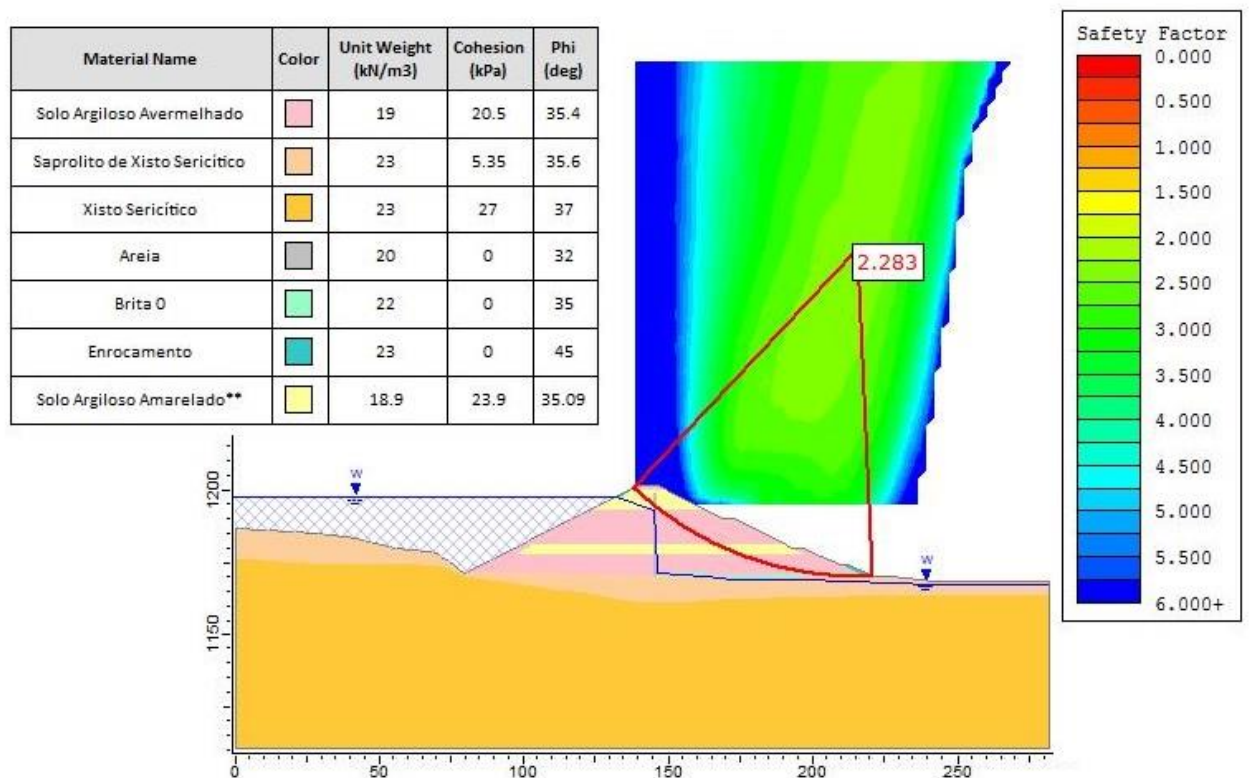


Figura 0.22 - Análise de Estabilidade – Variação do ângulo de atrito do solo amarelado – Cenário 1.

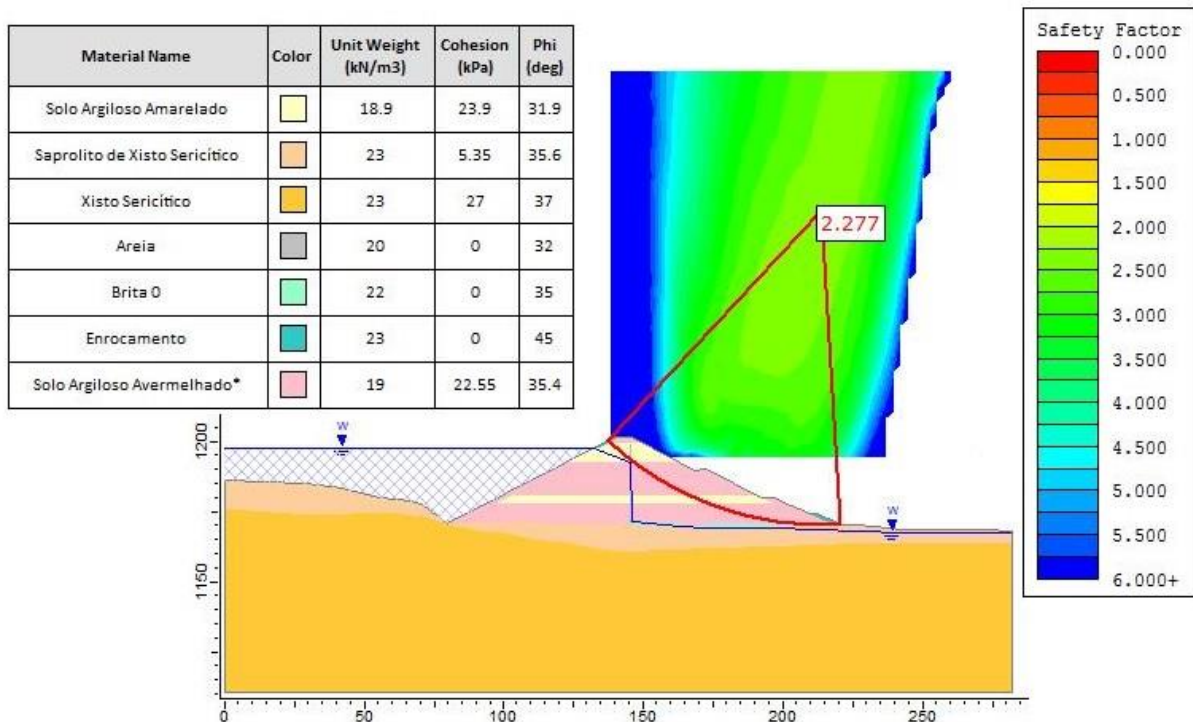


Figura 0.23 - Variação da coesão do solo avermelhado – Cenário 1.

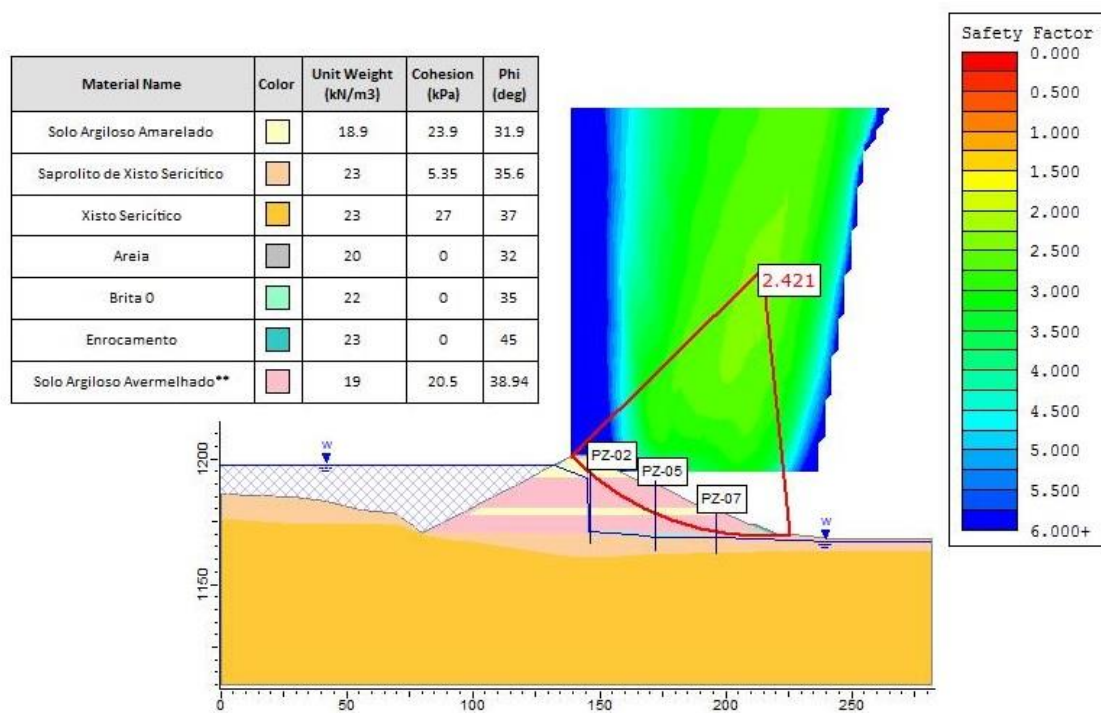


Figura 0.24 - Variação do ângulo de atrito do solo avermelhado – Cenário 1.

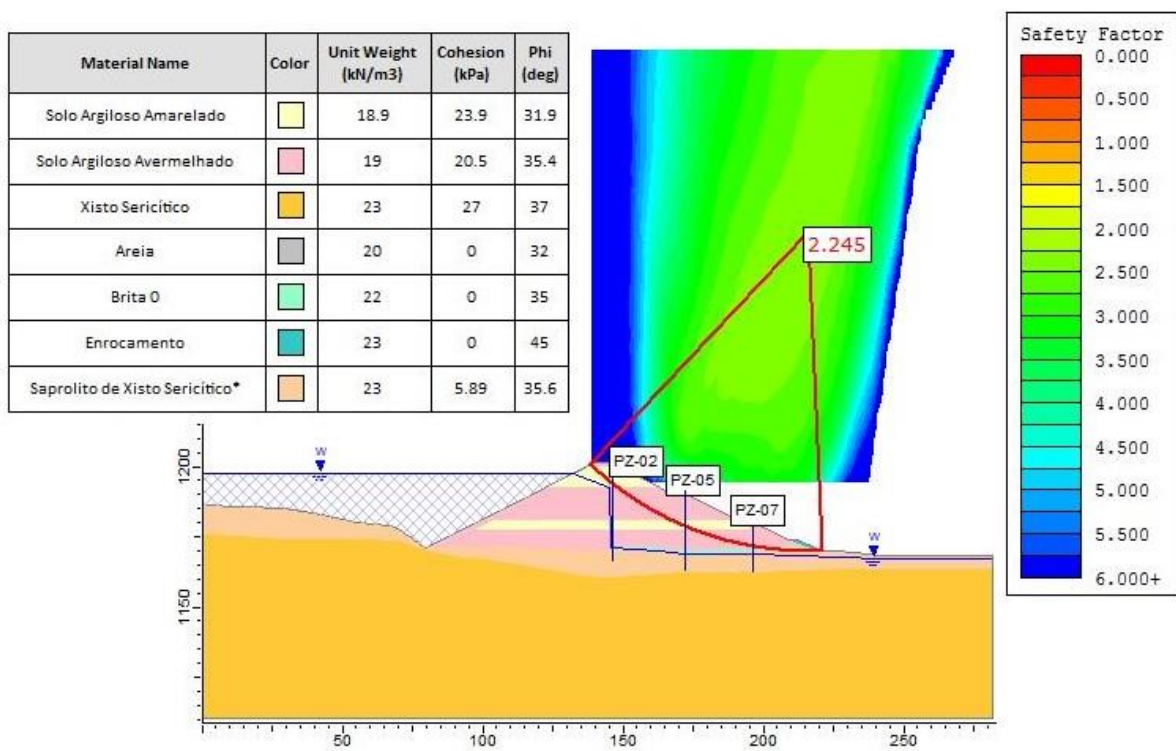


Figura 0.25 - Variação da coesão do solo saprolítico – Cenário 1.

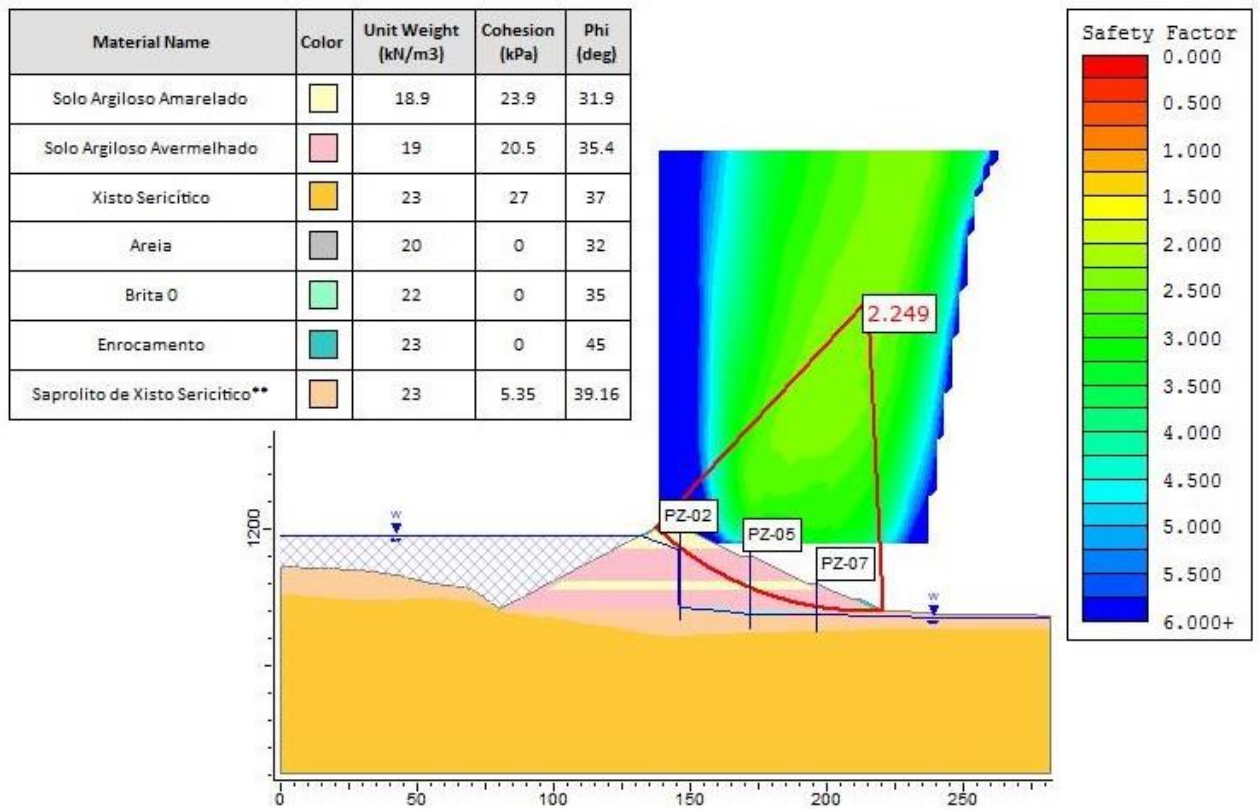


Figura 0.26 - Variação do ângulo de atrito do solo saprolítico – Cenário 1.

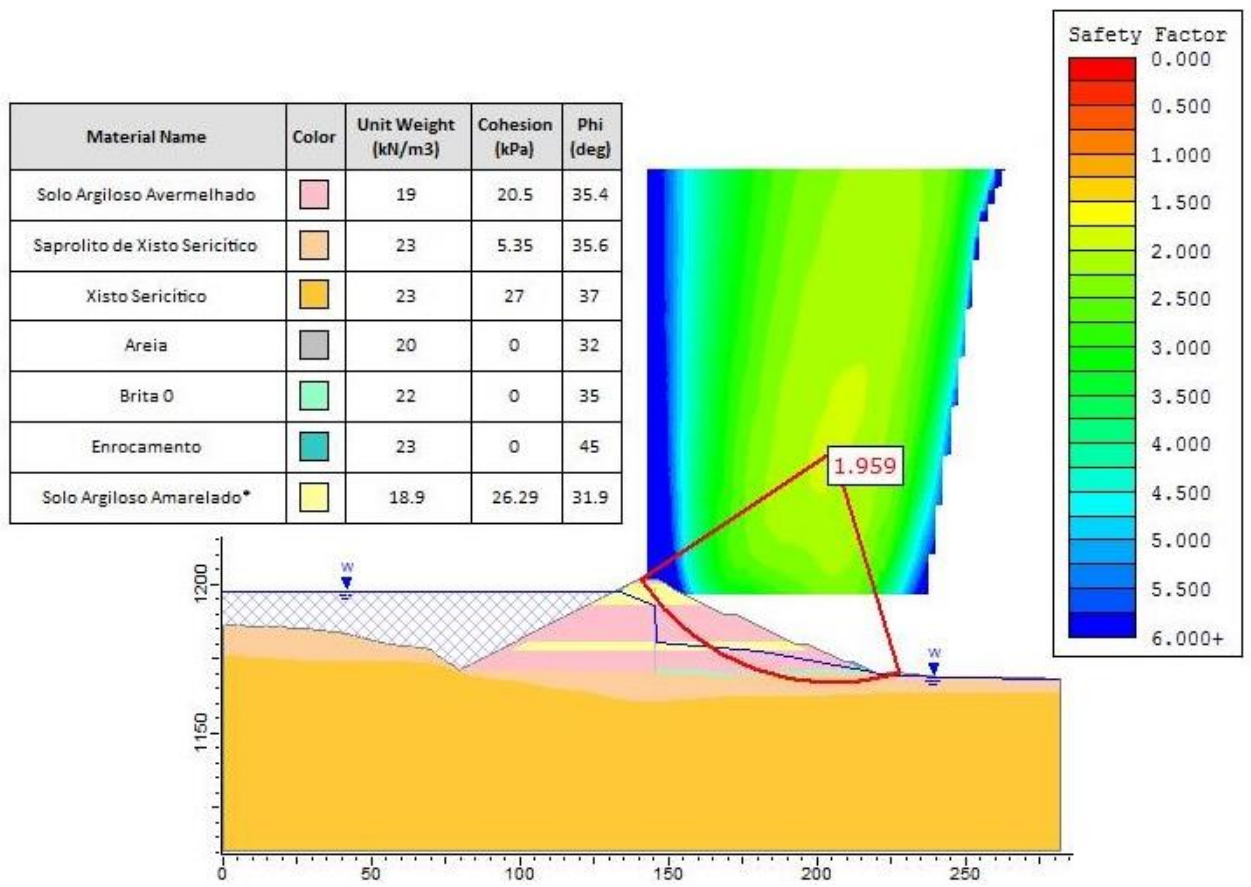


Figura 0.27 – Análise de Estabilidade – Variação da Coesão do solo amarelado – Cenário 2.

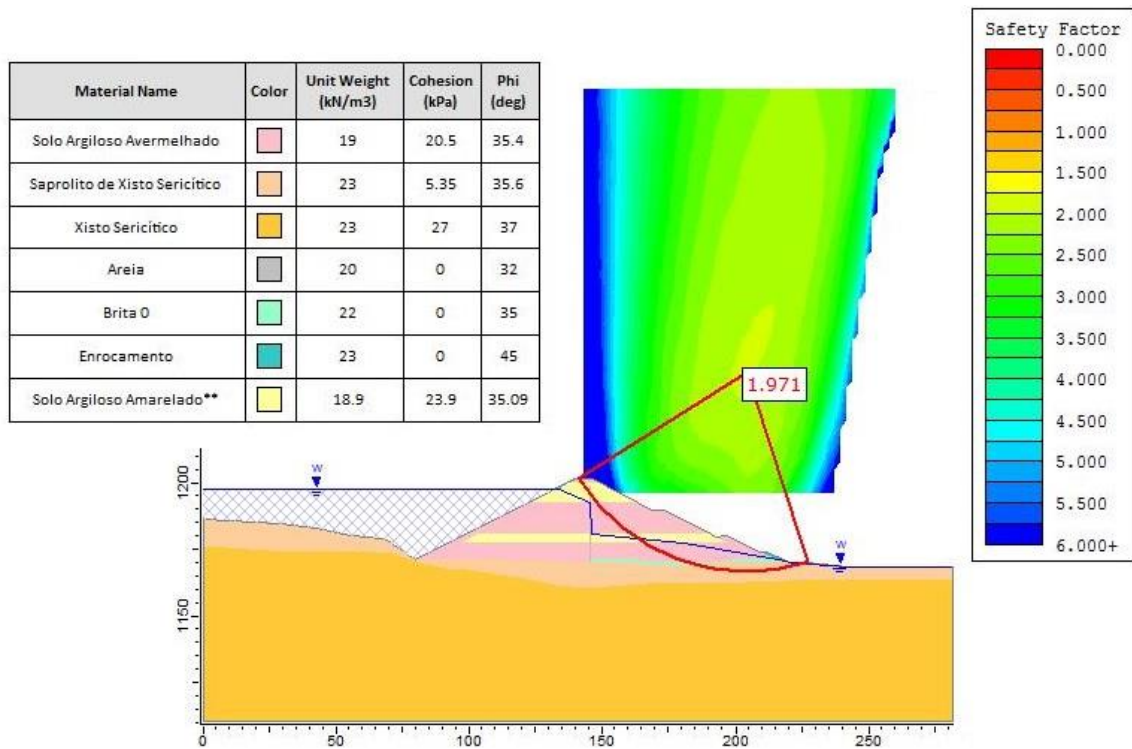


Figura 0.28 - Análise de Estabilidade – Variação do ângulo de atrito do solo amarelado – Cenário 2.

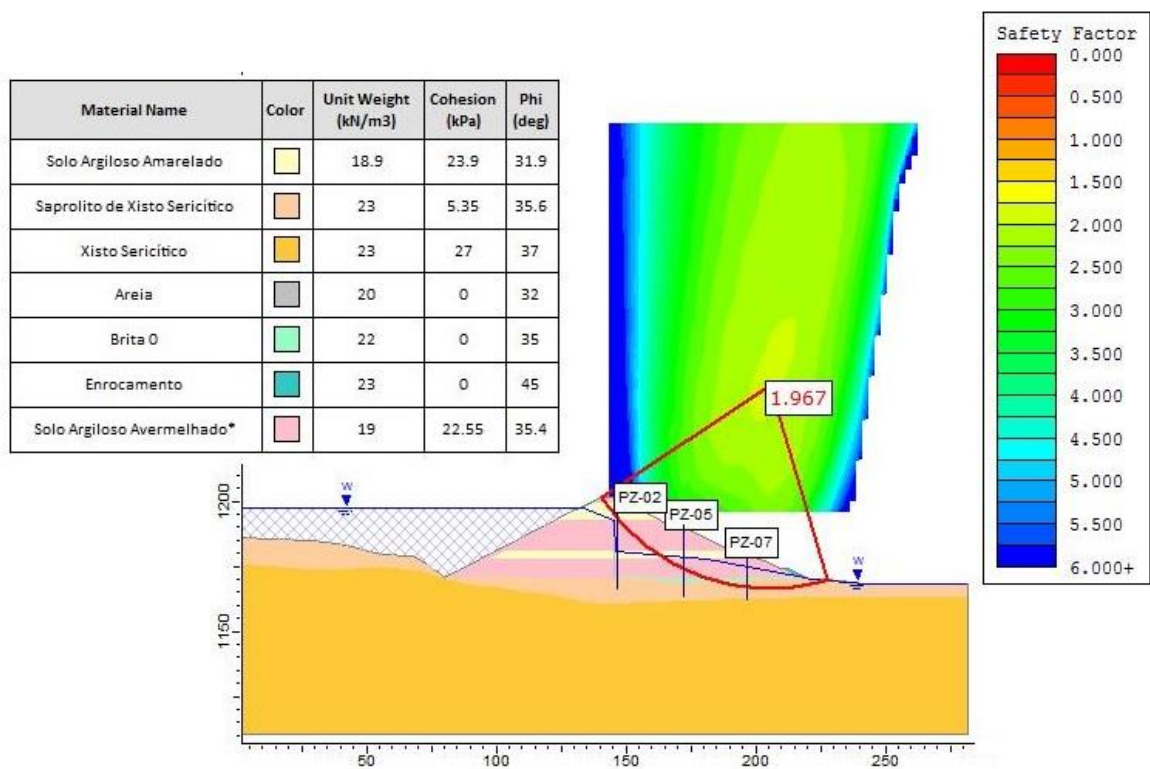


Figura 0.29 - Variação da coesão do solo avermelhado – Cenário 2.

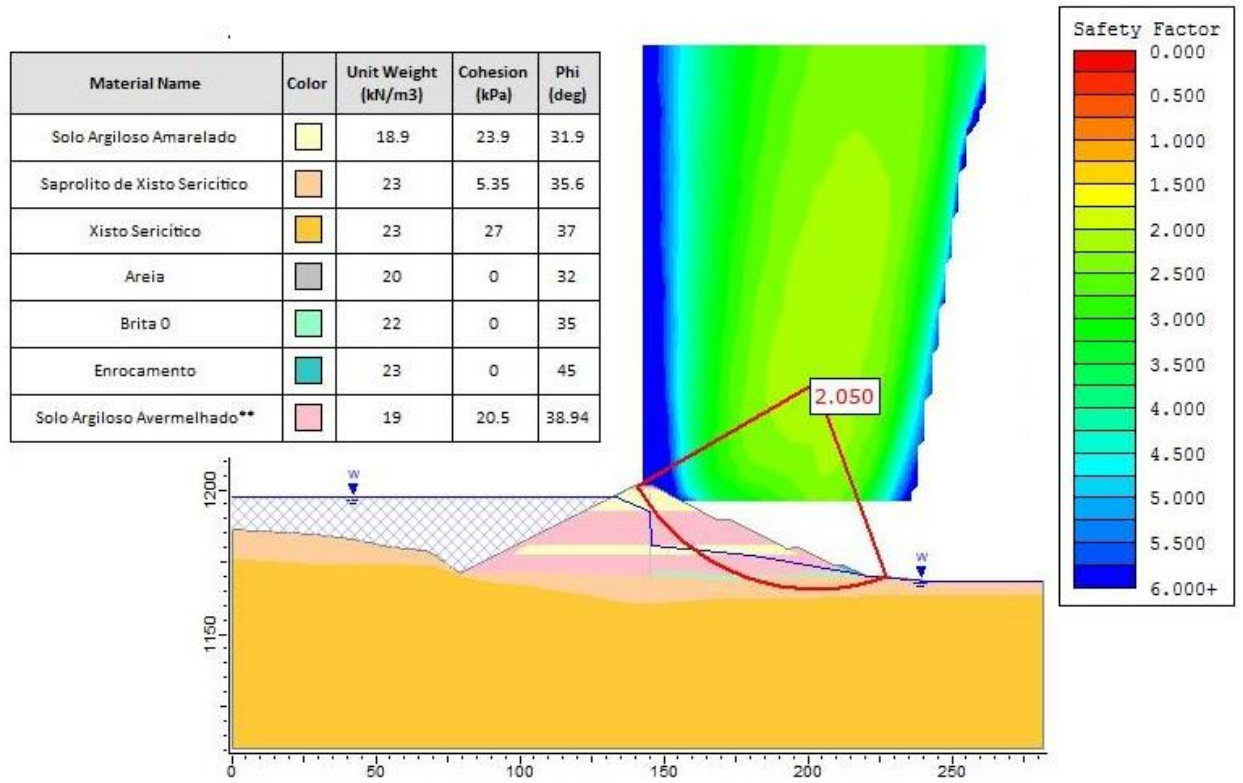


Figura 0.30 - Variação do ângulo de atrito do solo avermelhado – Cenário 2.

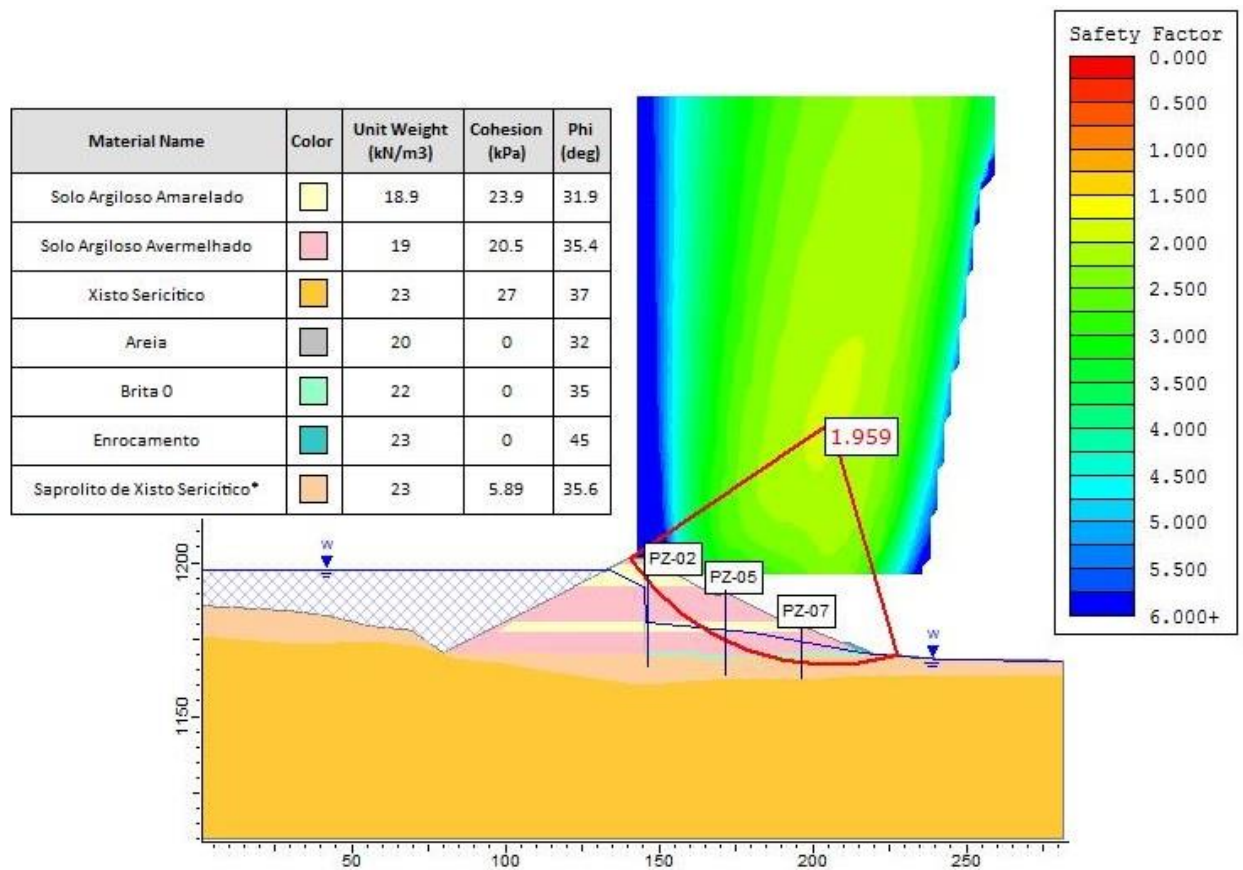


Figura 0.31 - Variação da coesão do solo saprolítico – Cenário 2.

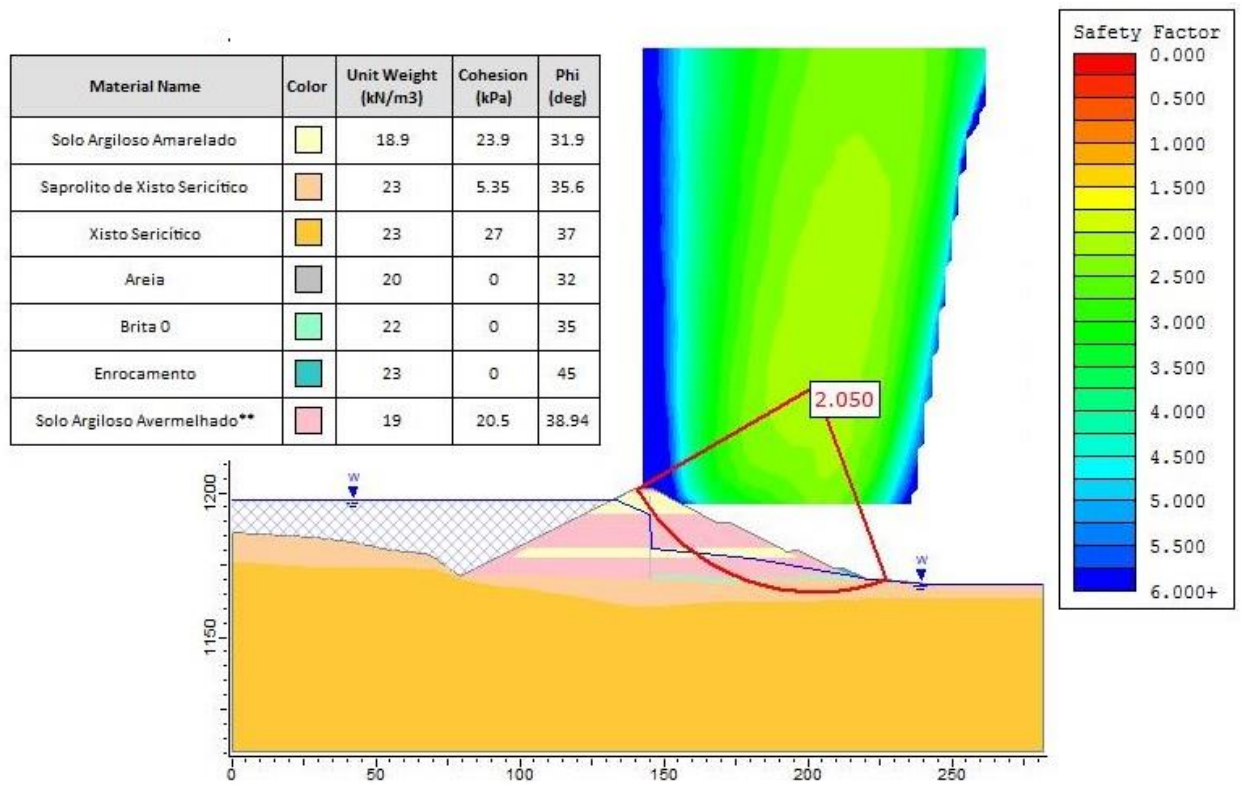


Figura 0.32 - Variação do ângulo de atrito do solo saprolítico – Cenário 2

As Figura 0.33 e Figura 0.34 apresentam a contribuição dos parâmetros na variância de FS do Cenário 1 e Cenário 2, respectivamente.

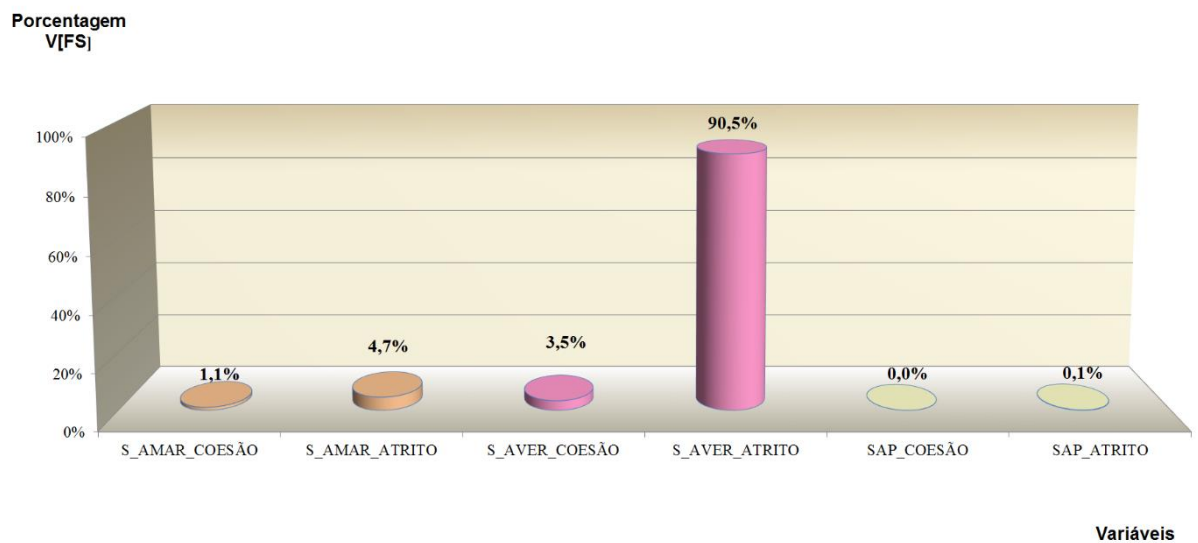


Figura 0.33 - Porcentagem de contribuição dos parâmetros na variância de FS – Cenário 1.

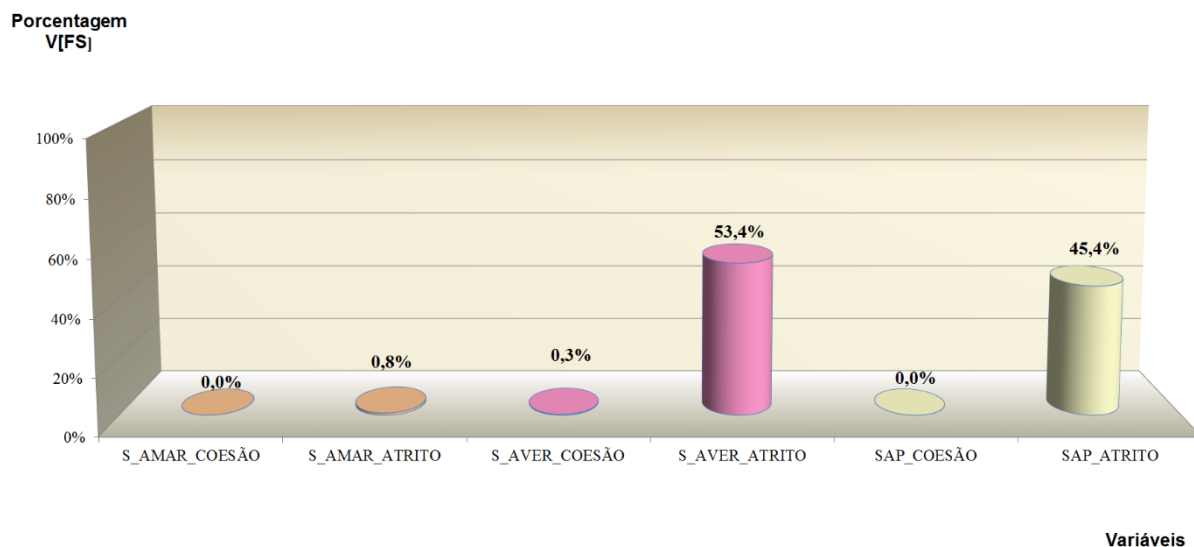


Figura 0.34 - Porcentagem de contribuição dos parâmetros na variância de FS – Cenário 2.

Observa-se que a variável que mais contribuiu na variância do Fator de Segurança para o cenário em estudo foi o ângulo de atrito do solo avermelhado, correspondendo a 90,5%, seguido pelo ângulo de atrito do solo amarelado com valor de 4,7%, já que a maior parte das superfícies de ruptura localizam-se nestes materiais. As demais variáveis pouco contribuem para a variância do Fator de Segurança. Nesse sentido, a **probabilidade de ruptura do cenário 1 por instabilização da barragem A pelo método de FOSM é igual a $1,0 \times 10^{-8}$** .

Nota-se que o parâmetro de maior relevância na variação do Fator de Segurança para o cenário em estudo foi o ângulo de atrito do solo avermelhado, correspondendo a 53,4%, seguido do ângulo de atrito do saprolito com valores de 45,4%. As demais variáveis pouco contribuem para a variância do Fator de Segurança. Nesse sentido, a **probabilidade de ruptura do cenário 2 por instabilização da barragem A pelo método de FOSM é igual a $1,0 \times 10^{-8}$** .

- MÉTODO DE MONTE CARLO

Para as simulações aqui apresentadas, o programa Slide® utilizou o gerador de números aleatórios “Parker & Miller v.3” e calculou uma nova superfície de ruptura global para cada nova simulação. Foram realizadas 100.000 simulações, cuja convergência pode ser avaliada pelas Figura 0.35 (cenário 1) e Figura 0.36 (cenário 2), habilitando o procedimento Overall Slope, visando obter maior número de fatores de segurança calculados e determinar uma distribuição com boa aderência às amostras.

Consideraram-se como variáveis aleatórias os parâmetros apresentados na Tabela 0.23, com seus respectivos valores médios, desvios-padrão e tipo de distribuição de probabilidades. Para os parâmetros com distribuição Normal, foram considerados como limites inferior e superior os valores referentes à distância de 2 vezes o desvio-padrão ao redor da média (Intervalo de Confiança que compreende 95,5% dos dados).

Os valores médios, desvios-padrão e respectivos limites inferior e superior dos parâmetros considerados para cada material estão apresentados na Tabela 0.28. Buscou-se obedecer à representatividade física para os limites inferior e superior dos parâmetros.

Tabela 0.28 – Média, desvio-padrão e limites inferior e superior considerados.

| COESÃO EFETIVA (kPa) | | | | | | |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Material | μ | σ | Mínimo Relativo | Máximo Relativo | Valor Absoluto Mínimo | Valor Absoluto Máximo |
| Saprolito de Xisto | 5,35 | 1,6 | 2,3 | 1,65 | 3,05 | 3,7 |
| Solo Argiloso Avermelhado | 20,5 | 7,2 | 10,5 | 14,4 | 10 | 34,9 |
| Solo Argiloso Amarelado | 23,9 | 9,6 | 4,8 | 4,8 | 19,1 | 28,7 |
| ÂNGULO DE ATRITO EFETIVO (°) | | | | | | |
| Material | μ | σ | Mínimo Relativo | Máximo Relativo | Valor Absoluto Mínimo | Valor Absoluto Máximo |
| Saprolito de Xisto | 35,6 | 10 | 5,6 | 4,4 | 30 | 40 |
| Solo Argiloso Avermelhado | 35,4 | 5 | 10 | 10 | 25,4 | 45,4 |
| Solo Argiloso Amarelado | 31,9 | 3,2 | 6,4 | 6,4 | 25,5 | 38,3 |

Os resultados das simulações de Monte Carlo realizadas para o Cenário 1 (Nível Operacional e Leituras Atuais de Monitoramento) e 2 (níveis críticos) são apresentados na Figura 0.35 e Figura 0.36. Destaca-se que este cenário corresponde à situação atual da Barragem, em termos de leituras piezométricas.

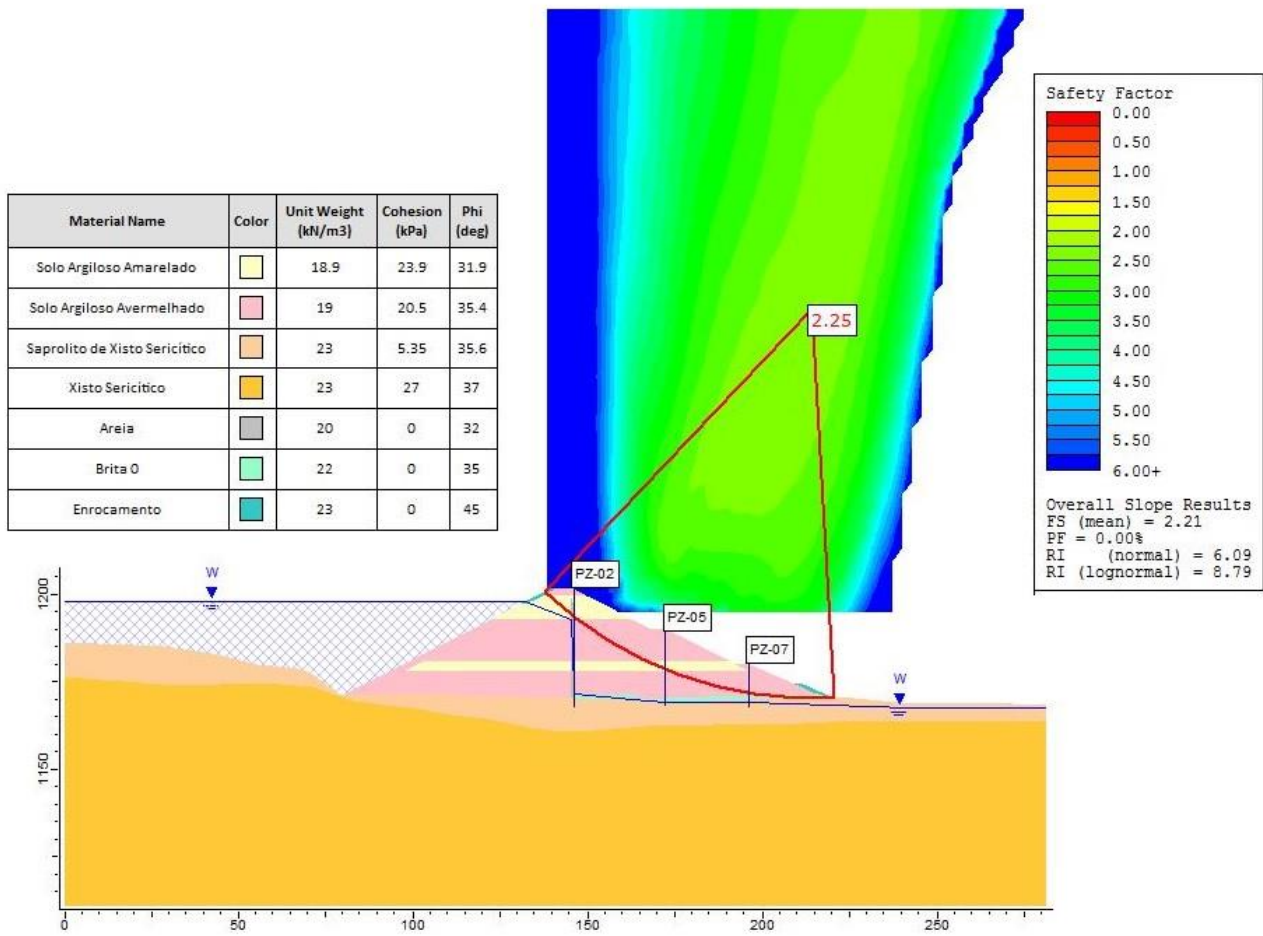


Figura 0.35 - Resultados das simulações de Monte Carlo – Cenário 1.

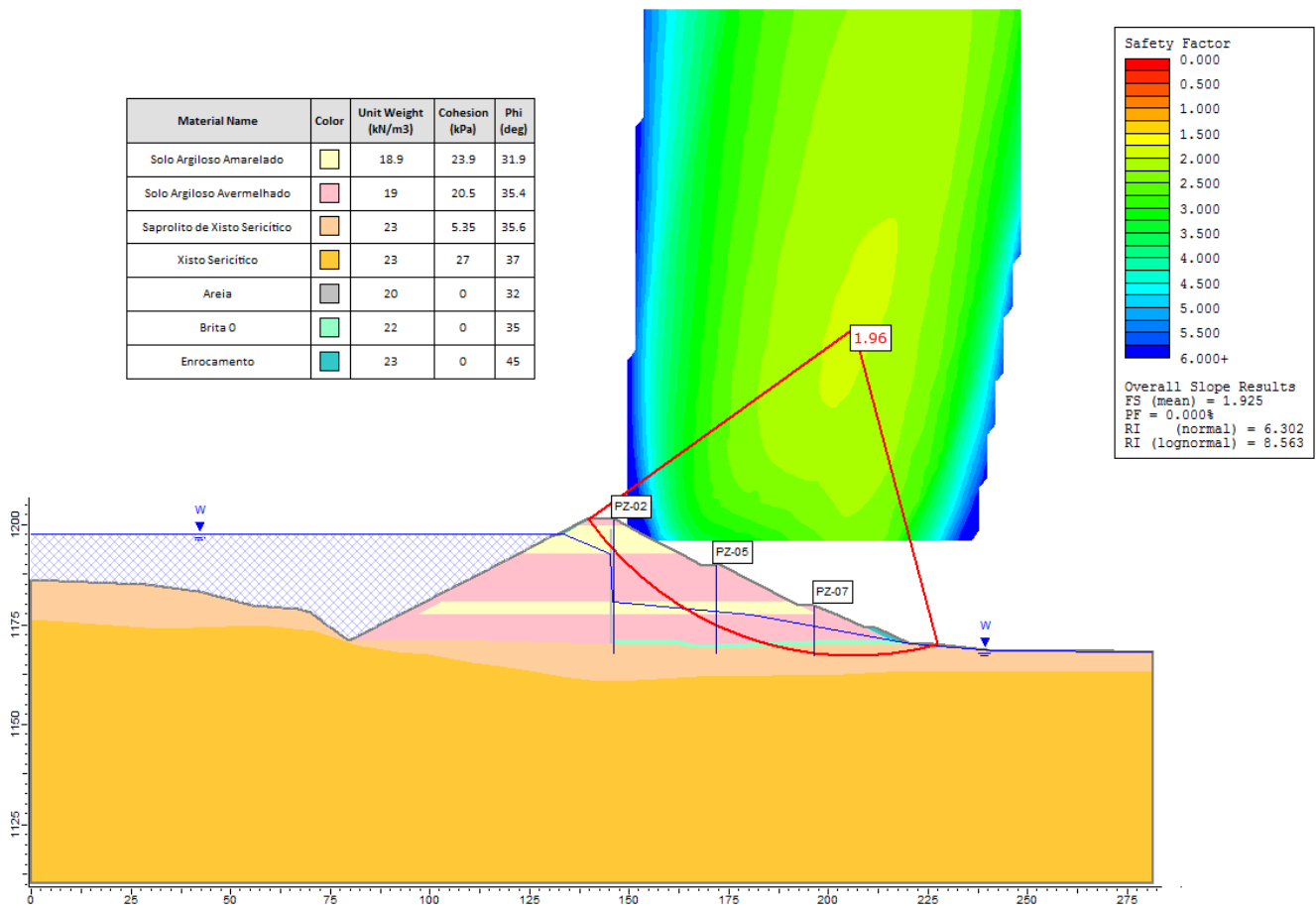


Figura 0.36 - Resultados das simulações de Monte Carlo – Cenário 2.

As análises foram realizadas no Slide 7.0, e os resultados por meio de gráficos estão apresentados na Figura 0.37, Figura 0.38 e Figura 0.39.

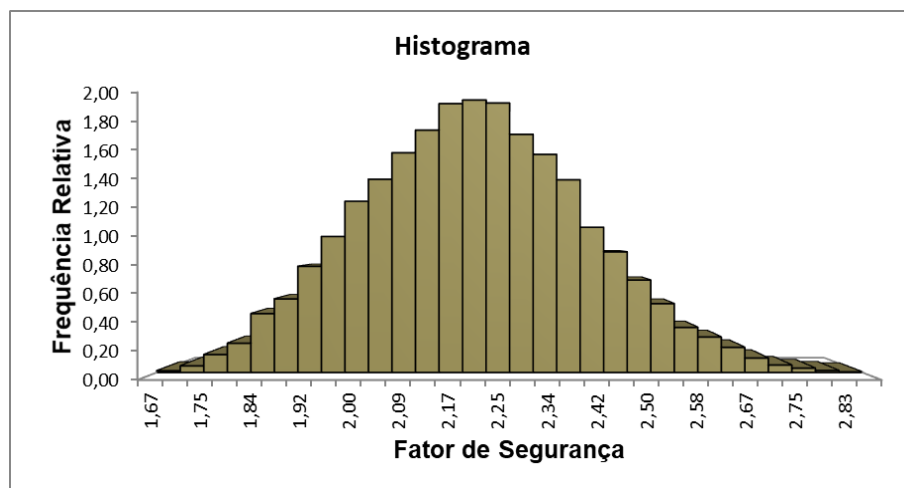


Figura 0.37 – Histograma dos Fatores de Segurança – Cenário 1.

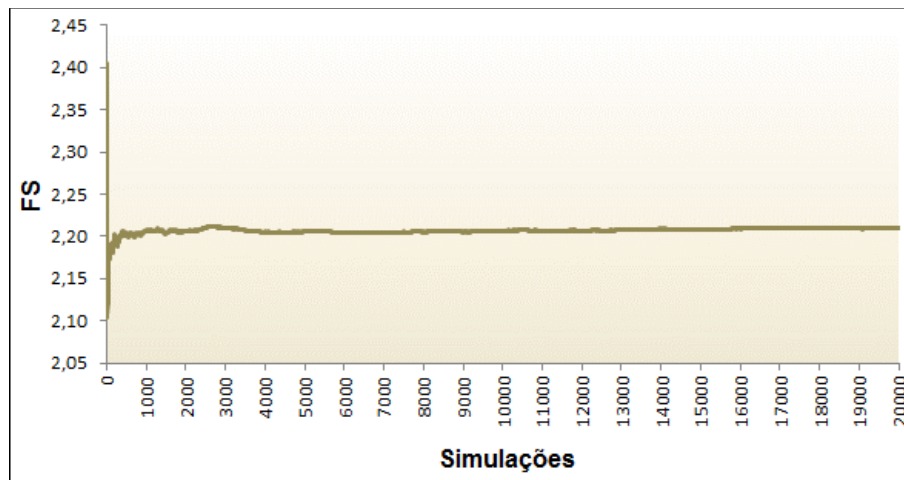


Figura 0.38 – Distribuição dos Fatores de Segurança em relação ao número de análises – Cenário 1.

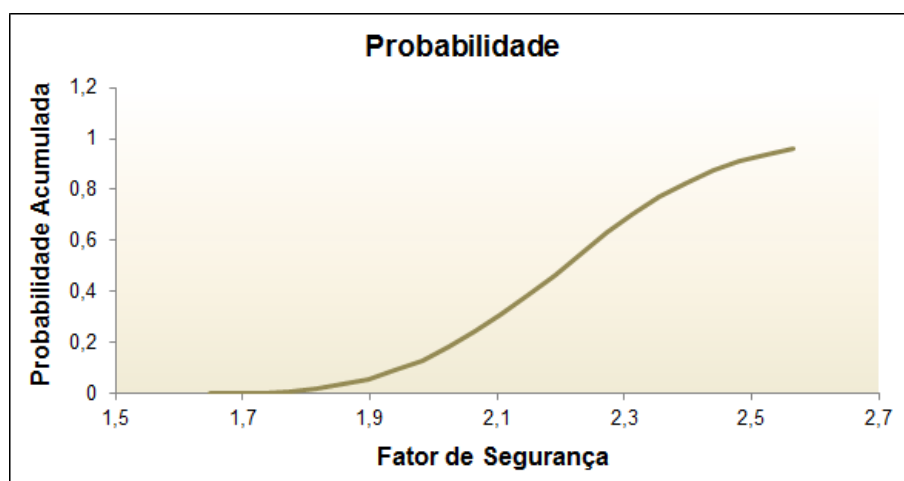


Figura 0.39 – Probabilidade dos Fatores de Segurança – Cenário 1.

Observa-se que o fator de segurança médio encontrado na análise foi de 2,21 e o fator de segurança determinístico de 2,25. Os resultados apresentaram índices de confiabilidade, quando assumido distribuição normal e log-normal, de 6,09 e de 8,79, respectivamente. A probabilidade de falha (PF) encontrada foi de 0,00%. Nota-se que nenhuma simulação resultou em $FS < 1$, ou seja, a probabilidade de ruptura obtida igual à zero (número de rupturas dividido pelo número de simulações) é um indicativo de que o valor da probabilidade “real” de ruptura é muito reduzido (menor que 10^{-8}).

As análises foram realizadas no Slide 7.0, e os resultados por meio de gráficos estão apresentados nas Figura 0.40, Figura 0.41 e Figura 0.42.

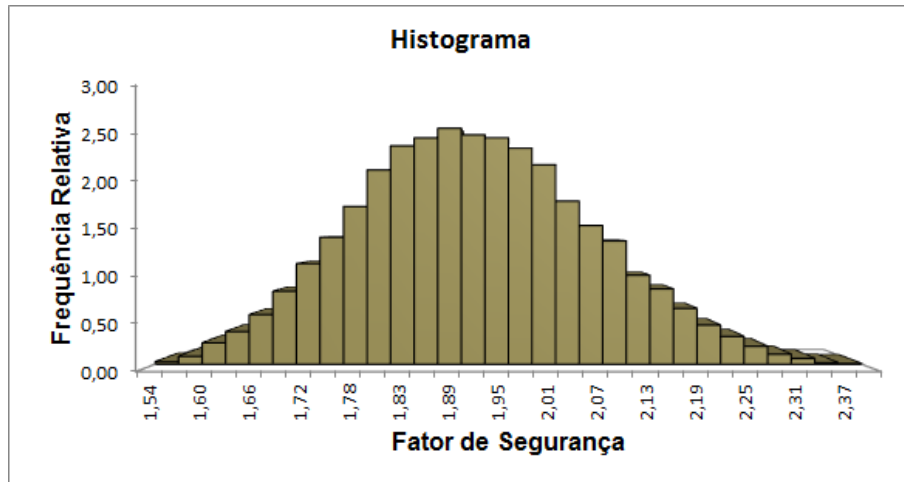


Figura 0.40 – Histograma dos Fatores de Segurança – Cenário 2.

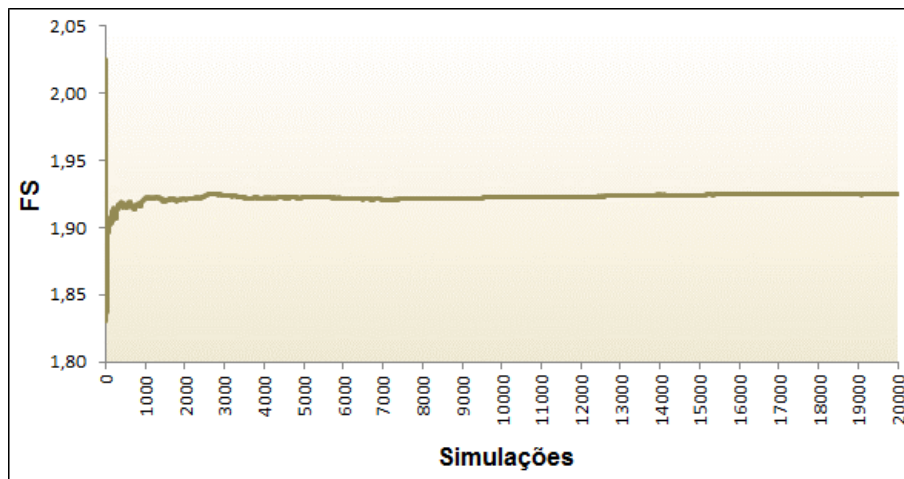


Figura 0.41 – Distribuição dos Fatores de Segurança em relação ao número de análises – Cenário 2.

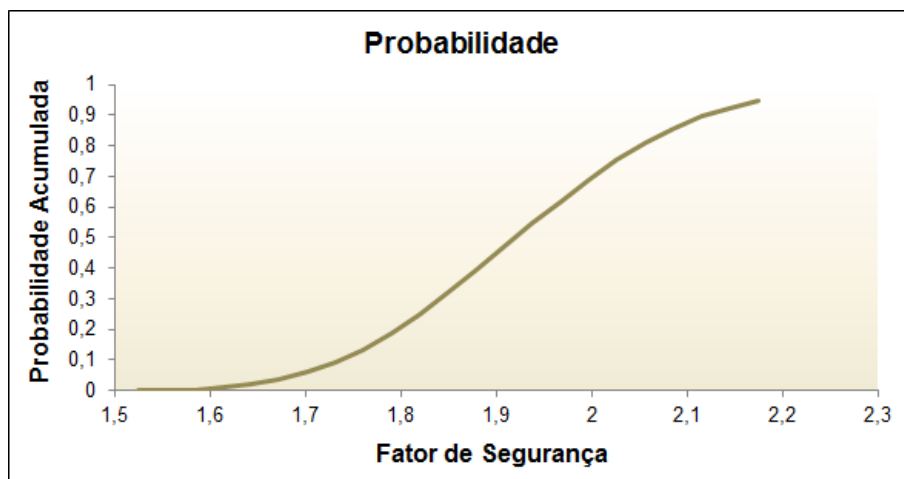


Figura 0.42 – Probabilidade dos Fatores de Segurança – Cenário 2.

Assim como no cenário 1, nota-se que, no Cenário 2, nenhuma simulação resultou em $FS < 1$, ou seja, a probabilidade de ruptura obtida é igual a zero (número de rupturas dividido pelo número de simulações). Isto é um indicativo de que o valor da probabilidade “real” de ruptura é muito reduzido (menor que 10^{-8}).

A Tabela 0.29 a seguir sintetiza as probabilidades de todos os cenários considerados para ocorrência de ruptura por instabilização.

Tabela 0.29 - Probabilidades de ocorrência de ruptura por instabilização.

| Cenário | Método de Ruptura | Probabilidade de Ruptura |
|---------|-------------------|--------------------------|
| 1 | Fosm | $1,0 \times 10^{-8}$ |
| | Monte Carlo | $1,0 \times 10^{-8}$ |
| 2 | Fosm | $1,0 \times 10^{-8}$ |
| | Monte Carlo | $1,0 \times 10^{-8}$ |

Para o cenário 1, a probabilidade de ruptura por instabilização da barragem A é igual a $1,0 \times 10^{-8}$.

Para o cenário 2, a probabilidade de ruptura por instabilização da barragem A é igual a $1,0 \times 10^{-8}$.

- MODO DE FALHA EROSÃO INTERNA

Neste capítulo são apresentadas as estimativas de probabilidade de ruptura da Barragem A associada à erosão interna.

A metodologia definida para a análise probabilística da ruptura da Barragem A associada à erosão interna foi a combinação de Árvore de Eventos (ETA) e Árvore de Falhas (FTA).

- EROSÃO INTERNA PELO MACIÇO

A Figura 0.43 apresenta a árvore de eventos elaborada para o cálculo da probabilidade de ruptura da estrutura por erosão interna pelo maciço, já que o maciço foi construído com materiais de diferentes características granulométricas. A probabilidade de ruptura calculada foi de **$6,0 \times 10^{-5}$** .

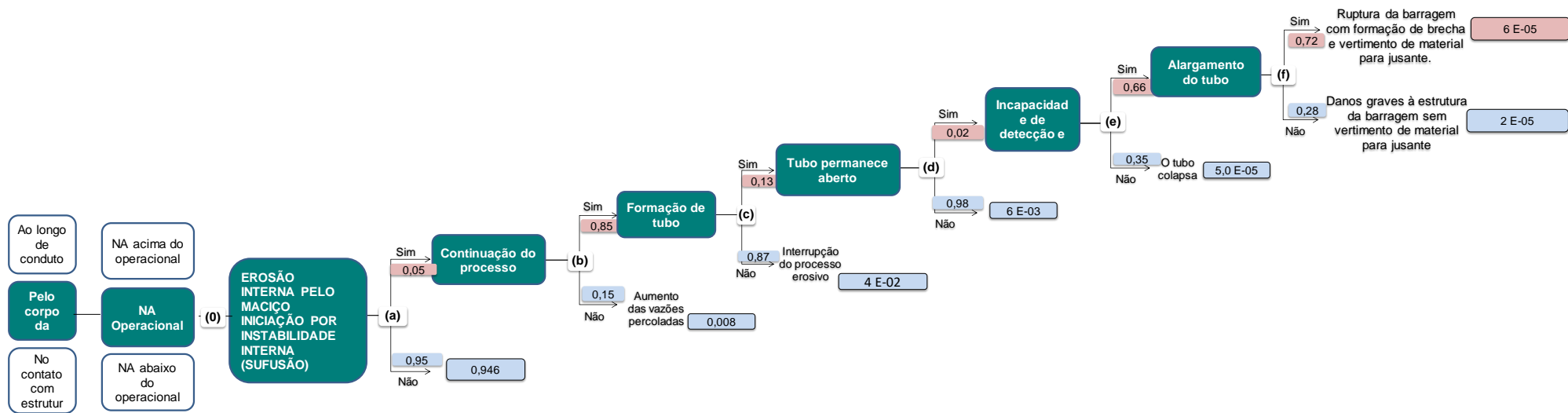


Figura 0.43 – Árvore de eventos – Erosão Interna pelo macio.

- Nó (0) – Nível do reservatório

Neste nó, analisa-se para qual nível do reservatório o processo de erosão interna é possível.

Considera-se que a erosão pelo maciço pode ter início com o reservatório no nível d'água operacional (N.A. na El.1.197,79 m). Desta forma, para este nó foi atribuída à probabilidade $P = 1$.

- Nó (a) – Início do processo erosivo

O evento iniciador do processo de erosão interna analisado corresponde à erosão interna pelo maciço por instabilidade interna. Diferente do exposto nesta figura, foi considerado que o processo de sufusão inicia-se na porção de montante do maciço, em função da característica do material e maior gradiente hidráulico, promovendo a migração de finos.

Nesta árvore de falha são consideradas as características de erodibilidade do maciço. A probabilidade de ocorrência deste nó da árvore de eventos foi estimada a partir da árvore de falhas 1 apresentada na Figura 0.44 e das considerações apresentadas nas Tabela 0.30 e Tabela 0.31.

a 0,054 (= a11 x a22)

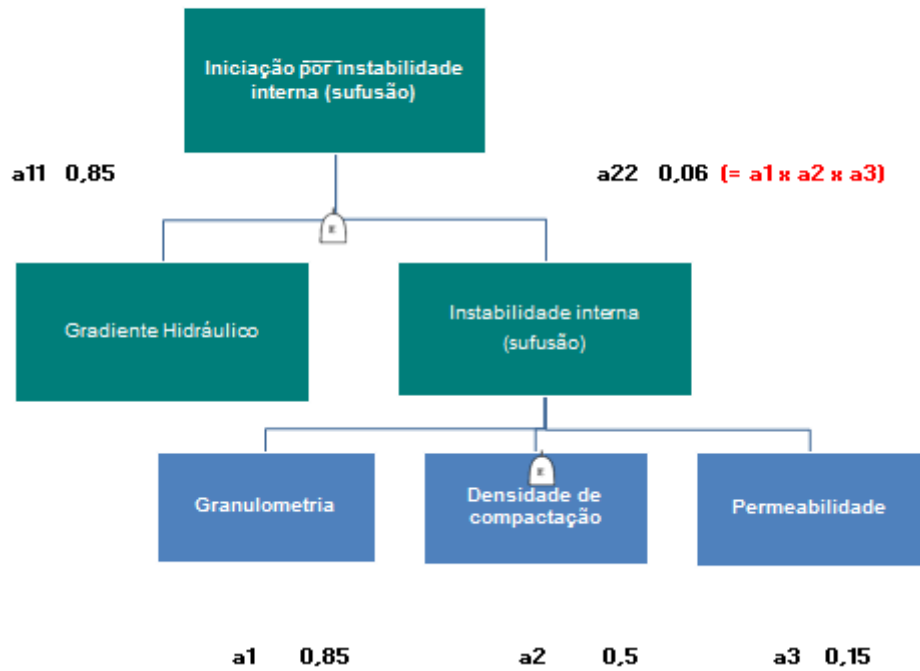


Figura 0.44 - Árvore de falhas 1 para o nó (a) da árvore de eventos para iniciação por instabilidade interna (sufusão).

Tabela 0.30 - Fatores de Influência na Probabilidade de Iniciação de Erosão Interna-Gradiente Hidráulico.

| Fator de influência | Virtualmente certo | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|-----------------------------|-------------------------------|---------------|--------|----------------|--|
| Gradiente Hidráulico | Presença de surgência de água | Alto | Médio | Baixo | De acordo com informações de projeto, o gradiente hidráulico é próximo a 0,7, na região do talude de montante, no contato entre Solo Argiloso Amarelado e Solo Argiloso Avermelhado. |

Tabela 0.31 - Fatores de Influência na Probabilidade de Sufusão em Solos sem Coesão (Foster and Fell, 2000 apud Fell, 2005).

| Fator de influência | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|---|---|--------------------------------------|--|---|
| Granulometria | | | | |
| - Geral | Granulometria aberta | | Graduação uniforme, bem graduado | O solo argiloso avermelhado, apresenta granulometria aberta, sendo mais susceptível à sufusão |
| - Solos de granulometria aberta (Sherard, 1979) | Cauda de finos na porção fina $d_{15c}/d_{15f} > 5$ (2) | - | $d_{15c}/d_{15f} < 5$ (2) | |
| - Gradação suave com cauda de finos baseado em Kenney and Lau (1985) ou Burenkova (1993) | Potencialmente instável | | Estável | |
| Densidade de compactação | Mal compactado, <95% do grau de compactação normal (1) | 95-98% do grau de compactação normal | Bem compactado, >98% do grau de compactação normal (1) | O aterro possui grau de compactação médio de 97,9% e desvio de umidade de +0,42%, com baixa plasticidade; |
| Permeabilidade | Alta | Moderada | Baixa | Os resultados dos ensaios de permeabilidades dos materiais de construção do maciço possuem o coeficiente de permeabilidade baixo. |

Nota 1: Caso <93% do grau de compactação normal, ramo seco da umidade, muito mais provável.

Nota 2: d_{15c} = diâmetro da partícula da fração grossa da curva granulométrica para a qual 15% das partículas teriam diâmetro inferior; d_{15f} = diâmetro da partícula da fração fina da curva granulométrica para a qual 15% das partículas teriam diâmetro inferior.

- Nó (b) – Continuação do processo erosivo

O nó (b) avalia se no ponto de saída da percolação existe algum tipo de sistema ou filtro capaz de impedir a evolução do processo de erosão.

A Tabela 0.32 apresenta os fatores de influência na probabilidade de continuação do processo erosivo.

Tabela 0.32 - Fatores de Influência na Probabilidade de Continuação do Processo Erosivo – Existência de Filtro no Ponto de Saída da Percolação.

| Fator de influência | Virtualmente certo | Mais Provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|---|---|--------------------------|------------------|----------------------|--|
| Existência de filtro no ponto de saída da percolação | Ausente ou saída livre ⁽¹⁾ . | Presente mas Inadequado. | Sem informações. | Presente e Adequado. | De acordo com as informações de obra, existe filtro no ponto de saída da percolação, construído de acordo com o projeto executivo. Conforme o critério de filtro para pequenas barragens do Bureau of Reclamation (2002), para filtrar o material avermelhado, o D15 da areia deveria estar compreendido entre os diâmetros 0,2 e 2,5 mm, porém, conforme Figura 0.45, o limite inferior não é atendido. |

Nota: Segundo USBR (2012), quando há uma saída aberta ou livre para o fluxo d'água, a probabilidade de continuação da erosão é virtualmente certa.

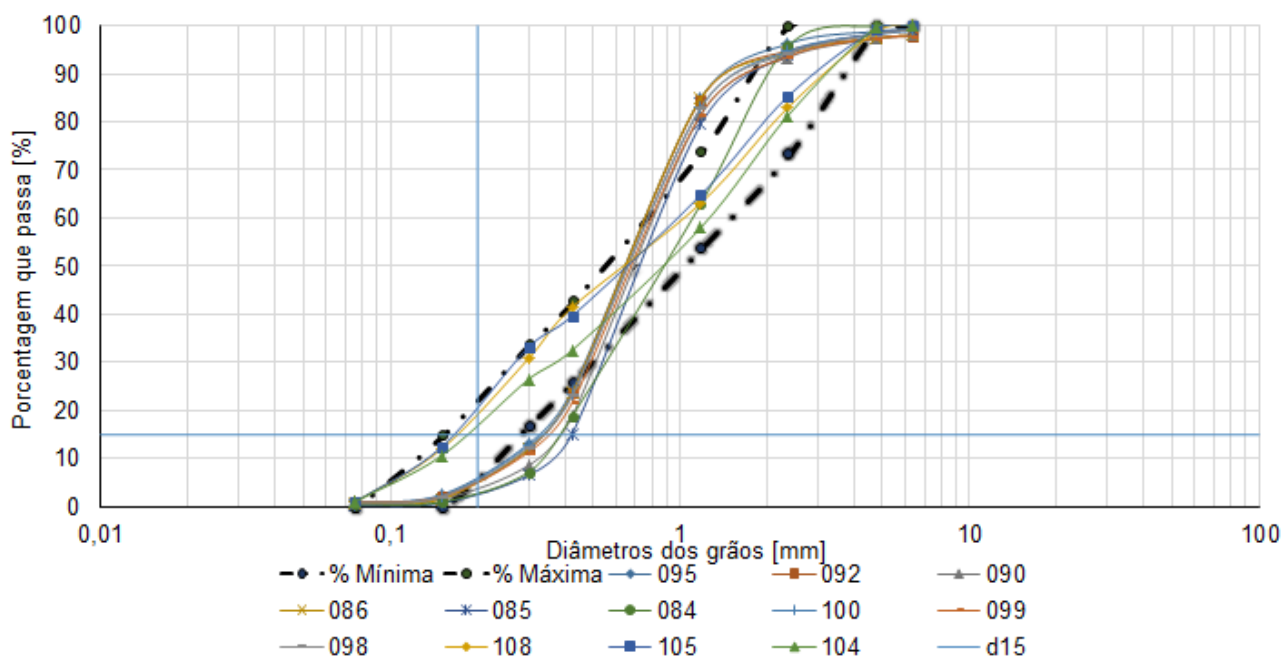


Figura 0.45 - Granulometria da areia do filtro vertical.

- Nó (c) – Formação do tubo

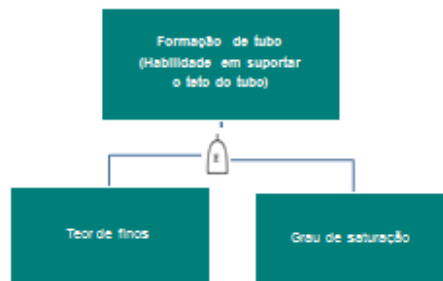
Este nó da árvore de eventos avalia a habilidade do material do maciço de suportar o teto do tubo, permitindo a ocorrência do entubamento (*piping*).

A avaliação deste nó é feita a partir da Árvore de Falhas 2 apresentada na Figura 0.46 e Tabela 0.33.

Árvores de Falhas 2

Progressão: Formação de tubo

$c = 0,18 = c1 \times c2$



$c1 = 0,9$

$c2 = 0,2$

Figura 0.46 - Árvore de falhas 2 para o nó (c) da árvore de eventos.

Tabela 0.33 - Fatores de Influência na Probabilidade de Formação do Tubo - Habilidade em Suportar o Teto (modificado Foster & Fell, 2000 *apud* Fell *et. al*, 2005).

| Fator de influência | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|---|---|----------------------------|---------------------------------|---|
| Teor de finos (% menor que 0,075mm) | Teor de finos > 15% | Teor de finos < 15% e > 5% | Sem finos ou teor de finos < 5% | A distribuição granulométrica dos materiais constituintes do maciço possui proporção de finos superior a 15%, alcançando valores de aproximadamente 50%. |
| Grau de saturação | Parcialmente saturado (primeiro enchimento) | - | Saturado | Neste caso, admite-se que o solo está saturado e não sofre ciclos de insaturação por variação do nível do reservatório, já que a barragem opera com o nível do reservatório na soleira do extravasor. |

- Nó (d) – Progressão: o tubo permanece aberto

A avaliação de permanência da abertura do tubo e feita no nó (d) através da Árvore De Falhas 3 apresentada na Figura 0.47 e das considerações apresentadas na Tabela 0.34 e Tabela 0.35.

Árvores de Falhas 3

Progressão: Tubo permanece aberto

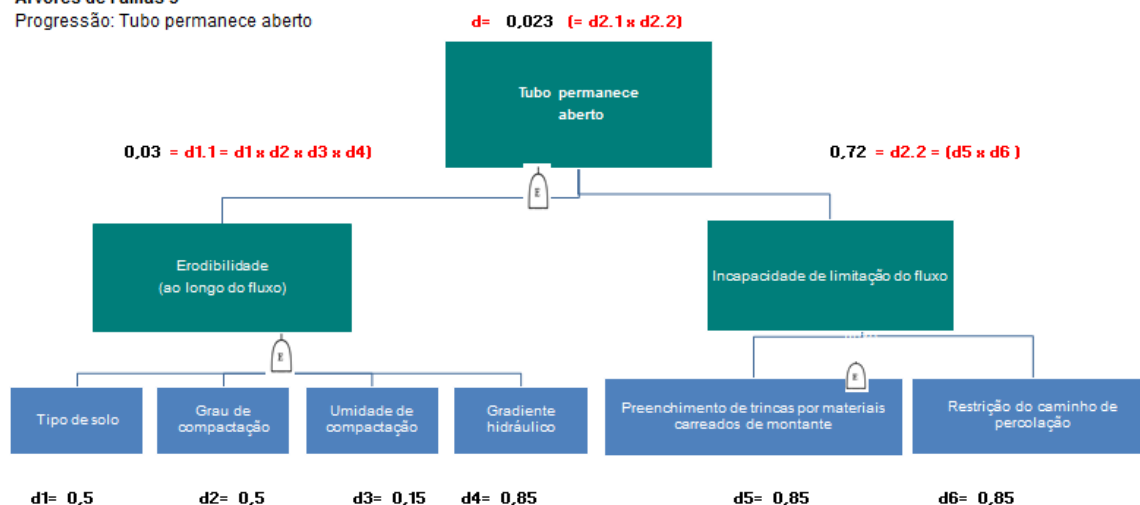


Figura 0.47 - Árvore de falhas 3 para o nó (d) da árvore de eventos

Tabela 0.34 - Fatores de Influência na Probabilidade de Progressão do Tubo - Erodibilidade (ao Longo do Fluxo) (modificado Foster & Fell, 2000 *apud* Fell *et. al*, 2005).

| Fator de influência | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|--|---|--|---|--|
| Tipo de solo ⁽¹⁾ | Muito uniforme, areia fina sem coesão (IP < 6) Solo bem graduado sem coesão (IP < 6) | Solo bem graduado com coesão (6 < IP < 15) | Argila plástica (IP > 15) | No solo amarelado, a amostra do maciço possui um IP de 15%. No controle tecnológico realizado pela Ápia em janeiro de 2017, o solo avermelhado apresentou IP = 21%, então, conservadoramente, foi o IP mais crítico. |
| Grau de Compactação | Mal compactado, GC < 95% do grau de compactação normal. | 95-98% do grau de compactação normal | Bem compactado, GC ≥ 98% do grau de compactação normal. | O aterro possui grau de compactação médio de 97,9% e desvio de umidade de +0,42%, com baixa plasticidade; |
| Umidade de Compactação | Mais seco do que a umidade ótima de compactação (cerca de -3% ou menor) | Compactação entre -1% e -2% da umidade ótima | Compactado na umidade ótima ou no ramo úmido | O aterro possui grau de compactação médio de 97,9% e desvio de umidade de +0,42%, com baixa plasticidade; |
| Gradiente Hidráulico ⁽²⁾ | Alto | Médio | Baixo | O gradiente hidráulico é próximo a 0,7, na região do talude de montante, no contato entre Solo Argiloso Amarelado e Solo Argiloso Avermelhado. |

Nota 1: Avaliações do material do aterro ao longo do fluxo.

Nota 2: Mesmo barragens com gradientes baixos, como 0,05 por exemplo, podem experimentar ruptura por erosão interna.

Nota 3: Caso exista a possibilidade do solo ser dispersivo, este fator de influência também poderá ser incluído nas análises, conforme Fell *et. al*, 2005.

Tabela 0.35 - Fatores de Influência na Probabilidade de Progressão do Tubo - Limitação do Fluxo (modificado Foster & Fell, 2000 *apud* Fell *et. al*, 2005).

| Fator de influência | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|---|---|--|---|---|
| Preenchimento de trincas por materiais carreados de montante | Barragem Homogênea. Zona de montante com material coesivo | - | Zona a montante do núcleo com capacidade para o preenchimento de trincas (solo não coesivo) | O maciço é constituído por material argiloso. |
| Restrição do fluxo pelo zoneamento de montante | Barragem homogênea. Zona de alta permeabilidade a montante do núcleo | Zona a montante do núcleo com permeabilidade média a alta. | Em barragens zonadas, zona granular a montante do núcleo com permeabilidade média a baixa / Barragem com núcleo de concreto ou de enrocamento com face de concreto. | O maciço é constituído por material argiloso. |

○ NÓ (E) – INCAPACIDADE DE DETECÇÃO E INTERVENÇÃO

Este nó da árvore de eventos avalia a incapacidade de detecção e intervenção do processo erosivo através da árvore de falhas 4 apresentada na Figura 0.48 e considerações apresentadas nas Tabela 0.36 e Tabela 0.37.

Árvores de Falhas 4

Incapacidade de detecção e intervenção

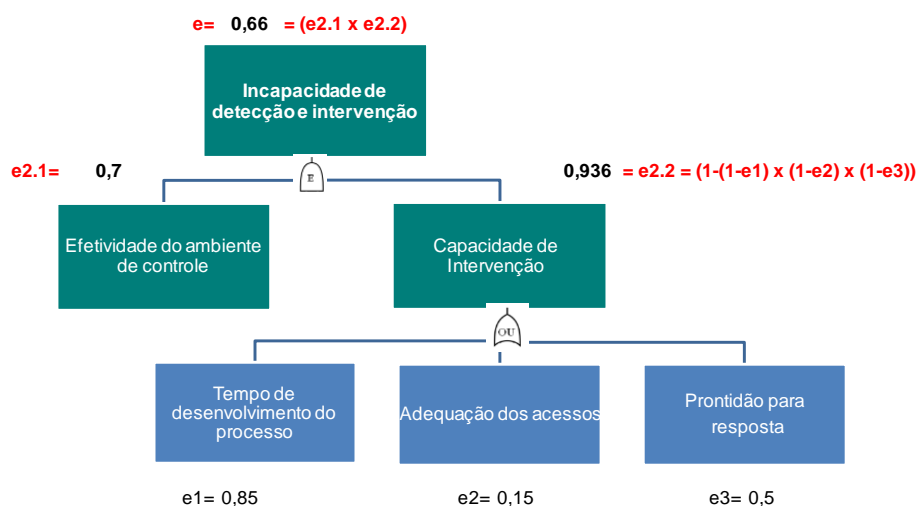


Figura 0.48 - Árvore de falhas 4 para o nó (e) da árvore de eventos.

Tabela 0.36 - Fatores de Influência na Probabilidade de Incapacidade de Detecção e Intervenção - Efetividade do Ambiente de Controle.

| Fator de influência | Mais provável | Bastante provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|---|--|---|--|---|--|
| Efetividade do ambiente de controle ⁽¹⁾ | Ambiente de controle informal ⁽²⁾ | Ambiente de controle padronizado ⁽³⁾ | Ambiente de controle monitorado ⁽⁴⁾ | Ambiente de controle otimizado ⁽⁵⁾ | A barragem é monitorada por meio de inspeção visuais e instrumentação. |

Nota1: A efetividade do ambiente de controle é um indicativo da probabilidade de não identificar um risco geotécnico em tempo hábil para sua neutralização antes da ocorrência da ruptura da barragem.

Nota 2: Ambiente de controle informal: Realização de inspeções visuais e leituras da instrumentação sem padronização, com controle parcial das ocorrências identificadas e de planos de ação. Ausência de treinamento formal ou comunicação dos controles.

Nota 3: Ambiente de controle padronizado: Realização de inspeções visuais e leituras da instrumentação padronizadas e com a periodicidade adequada; com controle das ocorrências identificadas e de planos de ação de forma estruturada. A instrumentação instalada pode ser parcialmente adequada para o monitoramento dos modos de falha e os tipos de controle existentes parcialmente adequados ou insuficientes.

Nota 4: Ambiente de controle monitorado: Controles existentes adequados e suficientes e suportados por sistema informatizado bem estruturado. Existência de treinamento formal e comunicação dos controles. Os dados da instrumentação são analisados periodicamente e o banco de dados da instrumentação possui alertas automáticos.

Nota 5: Ambiente de controle otimizado: Controles existentes adequados e suficientes e suportados por sistema informatizado que integra as informações de inspeções e auditorias internas e externas e sistema padronizado de análise de riscos, permitindo tomadas de decisão rápidas e eficientes. Equipe treinada e responsabilidades bem definidas.

Tabela 0.37 - Fatores de Influência na Probabilidade de Incapacidade de Detecção e Intervenção – Capacidade de Intervenção.

| Fator de influência | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|---|---|---|---|--|
| Tempo de formação da brecha ⁽¹⁾ | Rápido (horas) | Médio (dias a semanas). | Lento (semanas ou meses) | O tempo foi considerado rápido, devido a extensão horizontal que o piping precisará percorrer ao longo da seção. |
| Adequação dos acessos ⁽²⁾ | Acesso precário, em especial nos períodos chuvosos. | Obra em local de difícil acesso. | Obra em local de fácil acesso | Acesso fácil a região do pé da barragem. |
| Prontidão para resposta ⁽³⁾ | Inexistência de PAE, equipes sem treinamento. | Existência de PAE, equipes sem treinamento. | Disponibilidade e preparo da equipe de resposta | A barragem possui PAEBM, e equipe de resposta conforme informado pela equipe operacional. |

Nota 1: Tempo de evolução do processo ou tempo de formação da brecha: processos que evoluem rapidamente reduzem o tempo disponível para intervenções corretivas. A métrica utilizada foi adaptada de USBR, 2012 apud Fell et al., 2003.

Nota 2: A existência de acessos adequados reduz o tempo de execução de obras emergenciais.

Nota 3: A disponibilidade do Plano de Ação Emergencial (PAE) e de equipes treinadas reduz o tempo de resposta.

○ NÓ (F) – FORMAÇÃO DO MECANISMO DE FALHA – ALARGAMENTO DO TUBO

Este nó da árvore de eventos avalia a formação do mecanismo de falha adotado alargamento de tubo. O mecanismo foi considerado por ser o mais comum de acordo com as estatísticas de ruptura de barragens. A Figura 0.49 apresenta a árvore de eventos e Tabela 0.38 apresenta os fatores de influência na probabilidade de formação de brecha - Alargamento do Tubo (modificado Foster & Fell, 2000 apud Fell et. al, 2005).

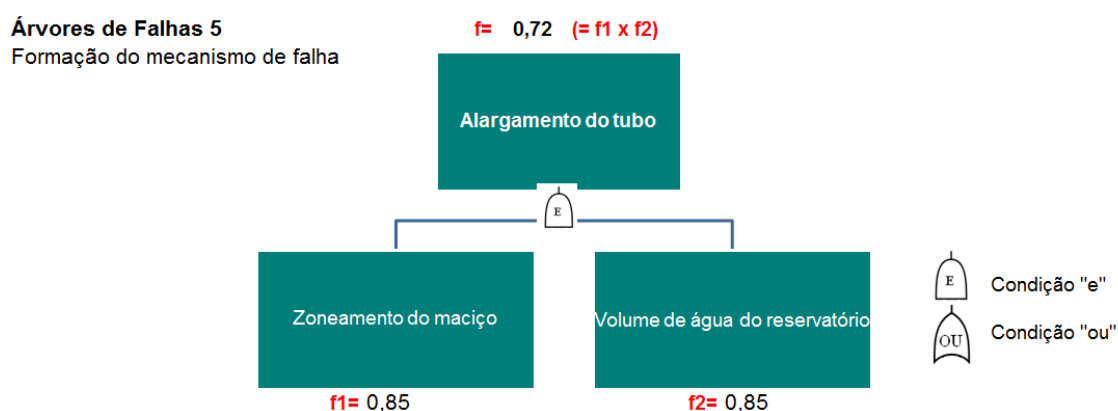


Figura 0.49 - Árvore de falhas 5 para o nó (f) da árvore de eventos.

Tabela 0.38 - Fatores de Influência na Probabilidade de Formação de Brecha - Alargamento do Tubo (modificado Foster & Fell, 2000 apud Fell et. al, 2005).

| Fator de influência | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|----------------------------------|--|--|--|--|
| Zoneamento do maciço | Seção Homogênea. Barragem zonada com zona de jusante capaz de suportar o teto do tubo | Barragem zonada, talude de jusante de areia ou pedregulho com finos. | Barragem zonada com talude de jusante de pedregulho ou enrocamento | |
| Volume de água armazenado | Elevado | - | Pequeno | Reservatório de 410.000,00 m ³ . Sendo esse volume de água disponível suficiente para alimentar o tubo e formar a brecha. |

• EROSÃO INTERNA PELA FUNDAÇÃO

A Figura 0.50 apresenta a árvore de eventos elaborada para o cálculo da probabilidade de

ruptura da estrutura por erosão interna pela fundação, onde na inspeção de campo foi observada uma surgência. A probabilidade de ruptura calculada foi de 3×10^{-6} e o sequenciamento do cálculo é apresentado na Tabela 0.36.

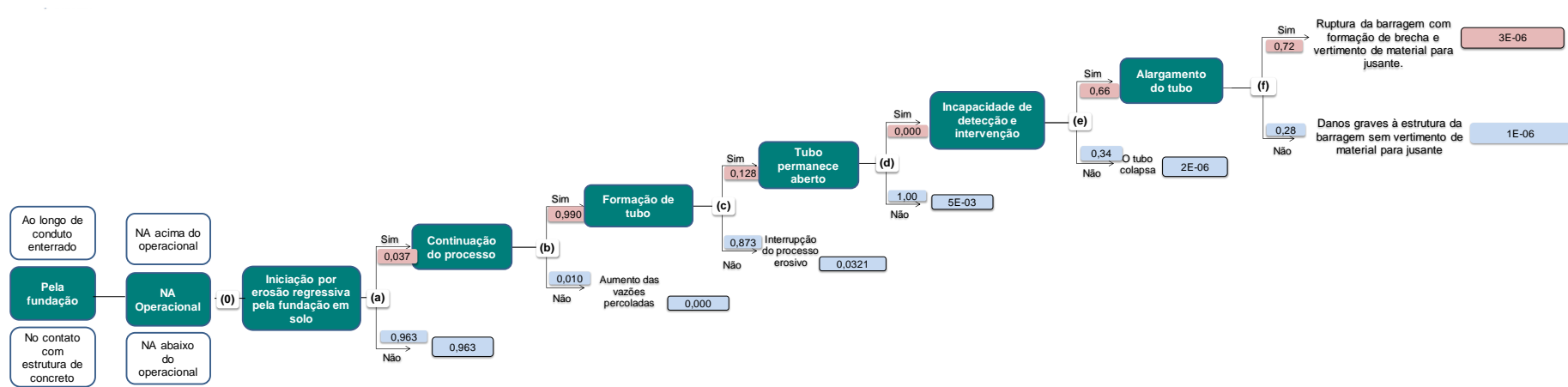


Figura 0.50 - Árvore de Eventos – Barragem A.

- Nó (0) – Nível do reservatório

Neste nó, analisa-se para qual nível do reservatório o processo de erosão interna é possível.

Considera-se que a erosão regressiva pela fundação pode ter início com o reservatório no nível d'água operacional (N.A. na El.1.197,79 m), haja vista que há uma surgência na ombreira direita, no contato com a drenagem superficial da primeira berma abaixo da crista. Desta forma, para este nó foi atribuída à probabilidade $P = 1$.

- Nó (a) – Início do processo erosivo

O evento iniciador do processo de erosão interna analisado corresponde à erosão regressiva pela fundação com entubamento (piping), conforme ilustrado na Figura 0.51.

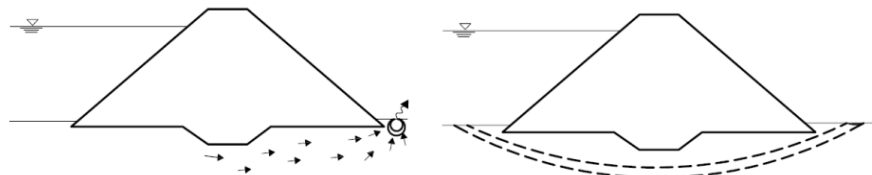


Figura 0.51 - Modelo de ruptura por erosão regressiva pela fundação, a partir de Foster e Fell (1999).

Nesta árvore de falha são consideradas as características de erodibilidade na fundação constituída por um saprolito de xisto sericítico de textura silto-arenosa. A probabilidade de ocorrência deste nó da árvore de eventos foi estimada a partir da árvore de falhas 1 apresentada na Figura 0.52 e das considerações apresentadas nas Tabela 0.39 e Tabela 0.40.

Árvores de Falhas 1 - C2.1

Iniciação por erosão regressiva pela fundação

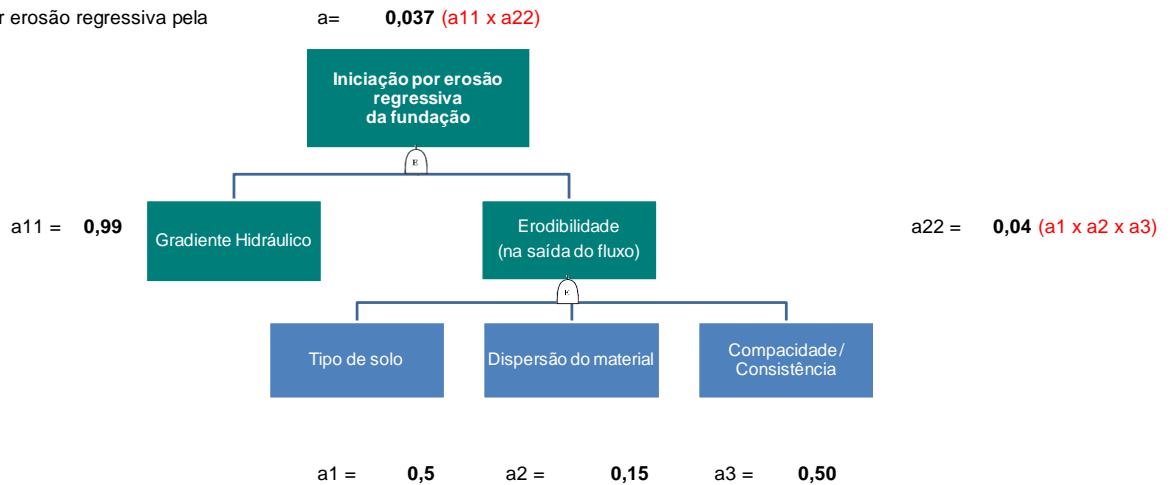


Figura 0.52 - Árvore de falhas 1 para o nó (a) da árvore de eventos

Tabela 0.39 - Fatores de influência na probabilidade de início de erosão regressiva (gradiente hidráulico).

| Fator de influência | Virtualmente certo | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|-----------------------------|-------------------------------|---------------|--------|----------------|---|
| Gradiente Hidráulico | Presença de surgência de água | Alto | Médio | Baixo | Foi identificada durante a inspeção de campo uma surgência na ombreira direita. |

Tabela 0.40 - Fatores de influência na probabilidade de condições para o início do processo erosivo (erodibilidade ao longo da fundação), modificado de Foster e Fell (1999) *apud* Fell *et. al.* (2005).

| Fator de influência | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|-----------------------------------|---|---|--|---|
| Tipo de solo | Muito uniforme, areia fina sem coesão (IP < 6). Solo bem graduado sem coesão (IP < 6). | Solo bem graduado com coesão (6 < IP < 15) | Argila plástica (IP > 15) | Segundo os ensaios realizados no material de fundação, o IP médio do material é igual a 7%. |
| Dispersão do material | Solos dispersivos, <i>Pinhole</i> D1, D2 | Solos potencialmente dispersivos, <i>Pinhole</i> PD1, PD2 | Solos não dispersivos, <i>Pinhole</i> ND1, ND2 | O solo de fundação é caracterizado como um Silte-Arenoso, portanto, não possui características dispersivas. |
| Compacidade ⁽¹⁾ | Fofo | Medianamente Compacto | Muito compacto | O saprolito de xisto presente na área estudada apresenta características de solo medianamente compacto. |

- Nó (b) – Continuação do processo erosivo

O nó (b) avalia se no ponto de saída da percolação existe algum tipo de sistema ou filtro capaz

de impedir a evolução do processo de erosão.

Segundo Von Thun (1996) apud Fell et. al. (2005), o requisito necessário para a ocorrência de erosão interna é a presença de um ponto de saída para a percolação sem a presença de um filtro, permitindo a remoção contínua de materiais erodidos. De acordo com o USBR (2015), se existir alguma saída ou abertura, não há potencial de filtragem por não existir filtro no ponto de saída, portanto a continuação da erosão é virtualmente certa.

A Tabela 0.41 apresenta os fatores de influência na probabilidade de continuação do processo erosivo.

Tabela 0.41 - Fatores de Influência na Probabilidade de Continuação do Processo Erosivo – Existência de Filtro no Ponto de Saída da Percolação.

| Fator de influência | Virtualmente certo | Mais Provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|---|---|--------------------------|------------------|-----------------------|---|
| Existência de filtro no ponto de saída da percolação | Ausente ou saída livre ⁽¹⁾ . | Presente mas Inadequado. | Sem informações. | Presente e Adequado. | A surgência ocorre na ombreira e não existe característica de filtro naquele ponto. |

Nota: Segundo USBR (2012), quando há uma saída aberta ou livre para o fluxo d'água, a probabilidade de continuação da erosão é virtualmente certa.

- Nó (c) – Formação do tubo

Este nó da árvore de eventos avalia a habilidade do material da ombreira em análise de suportar o teto do tubo, permitindo a ocorrência do entubamento (piping).

A avaliação deste nó é feita a partir da árvore de falhas 2 apresentada na Figura 0.53. A Tabela 0.42 apresenta fatores de influência na probabilidade de formação do tubo - habilidade em suportar o teto (modificado foster & fell, 2000 apud fell et. al, 2005).

Árvores de Falhas 2

Progressão: Formação de tubo

$$c = 0,128 \quad (=c1 \times c2)$$

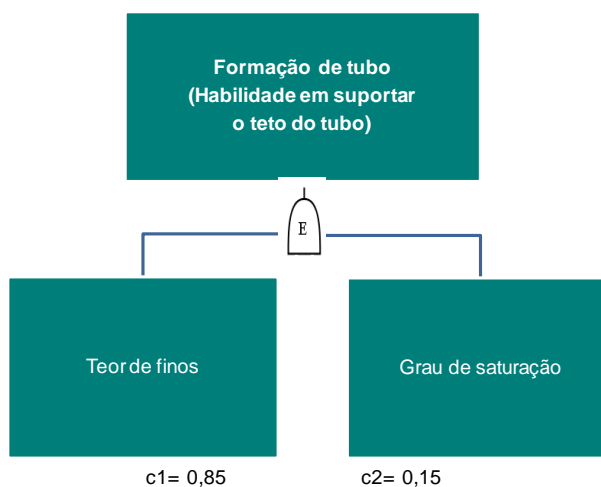


Figura 0.53 - Árvore de falhas 2 para o nó (c) da árvore de eventos.

Tabela 0.42 - Fatores de Influência na Probabilidade de Formação do Tubo - Habilidade em Suportar o Teto (modificado Foster & Fell, 2000 *apud* Fell *et. al*, 2005).

| Fator de influência | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|---|---|----------------------------|---------------------------------|---|
| Teor de finos (% menor que 0,075mm) | Teor de finos > 15% | Teor de finos < 15% e > 5% | Sem finos ou teor de finos < 5% | O teor médio de finos da fundação é maior que 50% |
| Grau de saturação | Parcialmente saturado (primeiro enchimento) | - | Saturado | Neste caso, admite-se que o solo está saturado e não sofre ciclos de insaturação por variação do nível do reservatório, já que a barragem opera com o NA soleira do extravasor. |

- NÓ (D) – PROGRESSÃO: O TUBO PERMANECE ABERTO

A avaliação de permanência da abertura do tubo e feita no nó (d) através da árvore de falhas 3 apresentada na Figura 0.54 e das considerações apresentadas nas Tabela 0.43 e Tabela 0.44.

Árvores de Falhas 3

Progressão: Tubo permanece aberto

$d = 0,00 (= d2.1 \times d2.2)$

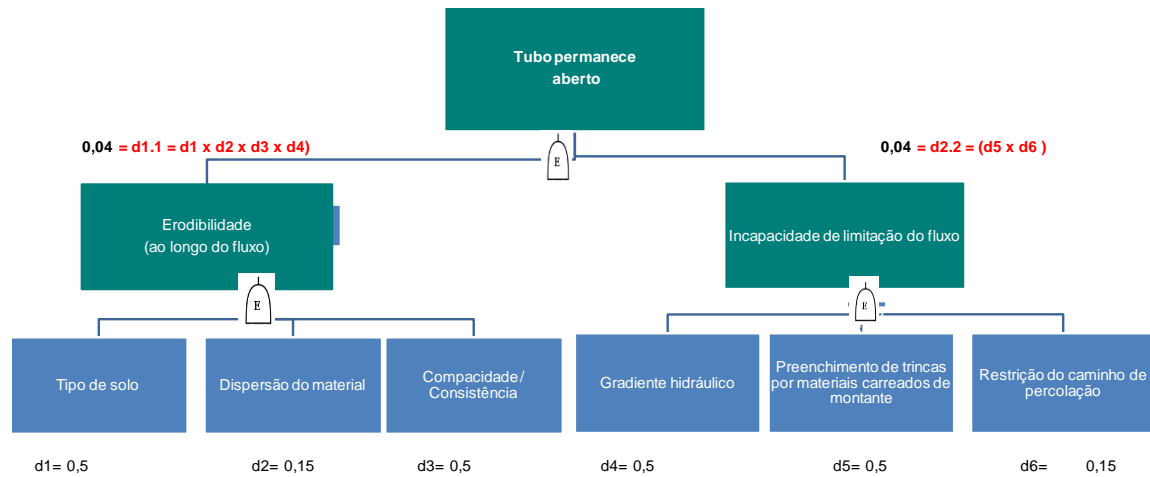


Figura 0.54 - Árvore de falhas 3 para o nó (d) da árvore de eventos.

Tabela 0.43 - Fatores de Influência na Probabilidade de Progressão do Tubo - Erodibilidade da Fundação ao Longo do Fluxo (modificado Foster & Fell, 2000 *apud* Fell *et. al*, 2005).

| Fator de influência | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|-----------------------------------|---|---|--|--|
| Tipo de solo | Muito uniforme, areia fina sem coesão (IP < 6). Solo bem graduado sem coesão (IP < 6). | Solo bem graduado com coesão (6 < IP < 15) | Argila plástica (IP > 15) | Segundo os ensaios realizados no material de fundação, apresentados no relatório RL-1190HH-X-30912_Ref02, o IP médio do material é igual a 7%. |
| Dispersão do material | Solos dispersivos, <i>Pinhole</i> D1, D2 | Solos potencialmente dispersivos, <i>Pinhole</i> PD1, PD2 | Solos não dispersivos, <i>Pinhole</i> ND1, ND2 | O solo de fundação é caracterizado como um Silte-Arenoso, portanto, não possui características dispersivas. |
| Compacidade ⁽¹⁾ | Fofo | Medianamente Compacto | Muito compacto | O saprolito de xisto presente na área estudada apresenta características de solo medianamente compacto. |

Tabela 0.44 - Fatores de Influência na Probabilidade de Progressão do Tubo - Limitação do Fluxo pela Fundação (modificado Foster & Fell, 2000 *apud* Fell *et. al*, 2005).

| Fator de influência | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|--|---|--|--|---|
| Preenchimento de trincas por materiais carreados de montante (do maciço ou da fundação) | Zoneamento homogêneo ou zona de montante de material coesivo. Camada de fundação sem coesão de baixa permeabilidade a montante da barragem. | Camada coesiva a montante da barragem (pode fissurar). | Barragem zonada com espaldar de montante de cascalho ou enrocamento. Camada de alta permeabilidade a montante da barragem. | O material a montante do barramento apresenta características coesivas, conforma relatório RL-1190HH-X-30912_Ref02. |
| Restrição do caminho de percolação | Caminho de percolação sem restrição de dimensões; ou caminho de percolação restrito mas de grandes dimensões (por exemplo, grandes canais de dissolução de calcário). | - | Caminho de percolação restrito de pequena largura (por exemplo, trincas em paredes de <i>cut off</i> ou juntas estreitas em rochas). | O material da ombreira apresenta caminho restrito para a percolação, por se tratar de juntas estreitas em rocha. Aberturas das descontinuidades classificadas como fechadas durante o mapeamento de campo (VG17-119-1-EG-RTE-0002). |
| Gradiente hidráulico ⁽¹⁾ | Alto. | Médio. | Baixo. | O estudo numérico indicou GI máximo de 0,6. Sendo assim foi adotado GI médio. |

- Nó (e) – Incapacidade de detecção e intervenção

Este nó da árvore de eventos avalia a incapacidade de detecção e intervenção do processo erosivo através da árvore de falhas 4 apresentada na Figura 0.55 e considerações apresentadas nas Tabela 0.45 e Tabela 0.46.

Árvores de Falhas 4
Incapacidade de detecção e intervenção

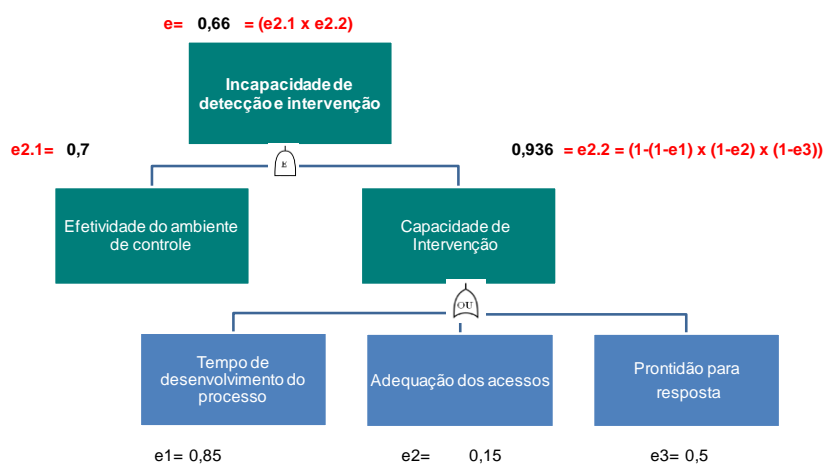


Figura 0.55 - Árvore de falhas 4 para o nó (e) da árvore de eventos

Tabela 0.45 - Fatores de Influência na Probabilidade de Incapacidade de Detecção e Intervenção - Efetividade do Ambiente de Controle.

| Fator de influência | Mais provável | Bastante provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|---|--|---|--|---|---|
| Efetividade do ambiente de controle ⁽¹⁾ | Ambiente de controle informal ⁽²⁾ | Ambiente de controle padronizado ⁽³⁾ | Ambiente de controle monitorado ⁽⁴⁾ | Ambiente de controle otimizado ⁽⁵⁾ | Existem leituras e inspeções visuais regulares, existem procedimentos de inspeção e monitoramento, a gestão de segurança é feita por equipe especializada, os dados são armazenados e interpretados periodicamente com planos de reposta. Possui Auditoria Externa. |

Nota1: A efetividade do ambiente de controle é um indicativo da probabilidade de não identificar um risco geotécnico em tempo hábil para sua neutralização antes da ocorrência da ruptura da barragem.

Nota 2: Ambiente de controle informal: Realização de inspeções visuais e leituras da instrumentação sem padronização, com controle parcial das ocorrências identificadas e de planos de ação. Ausência de treinamento formal ou comunicação dos controles.

Nota 3: Ambiente de controle padronizado: Realização de inspeções visuais e leituras da instrumentação padronizadas e com a periodicidade adequada; com controle das ocorrências identificadas e de planos de ação de forma estruturada. A instrumentação instalada pode ser parcialmente adequada para o monitoramento dos modos de falha e os tipos de controle existentes parcialmente adequados ou insuficientes.

Nota 4: Ambiente de controle monitorado: Controles existentes adequados e suficientes e suportados por sistema informatizado bem estruturado. Existência de treinamento formal e comunicação dos controles. Os dados da instrumentação são analisados periodicamente e o banco de dados da instrumentação possui alertas automáticos.

Nota 5: Ambiente de controle otimizado: Controles existentes adequados e suficientes e suportados por sistema informatizado que integra as informações de inspeções e auditorias internas e externas e sistema padronizado de análise de riscos, permitindo tomadas de decisão rápidas e eficientes. Equipe treinada e responsabilidades bem definidas.

Tabela 0.46 - Fatores de Influência na Probabilidade de Incapacidade de Detecção e Intervenção – Capacidade de Intervenção.

| Fator de influência | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|--|--|---|---|--|
| Tempo de formação da brecha ⁽¹⁾ | Rápido (horas) | Médio (dias a semanas). | Lento (semanas ou meses) | O tempo foi considerado rápido, devido à extensão horizontal que o piping precisará percorrer ao longo da seção. |
| Adequação dos acessos ⁽²⁾ | Acesso precário, em especial nos períodos chuvosos | Obra em local de difícil acesso. | Obra em local de fácil acesso | Acesso fácil a região do pé da barragem. |
| Prontidão para resposta ⁽³⁾ | Inexistência de PAE, equipes sem treinamento | Existência de PAE, equipes sem treinamento. | Disponibilidade e preparo da equipe de resposta | A barragem possui PAEBM, e equipe responsável pela operação. |

Nota 1: Tempo de evolução do processo ou tempo de formação da brecha: processos que evoluem rapidamente reduzem o tempo disponível para intervenções corretivas. A métrica utilizada foi adaptada de USBR, 2012 apud Fell et al., 2003.

Nota 2: A existência de acessos adequados reduz o tempo de execução de obras emergenciais.

Nota 3: A disponibilidade do Plano de Ação Emergencial (PAE) e de equipes treinadas reduz o tempo de resposta.

- Nó (f) – Formação do mecanismo de falha – alargamento do tubo

Este nó da árvore de eventos avalia a formação do mecanismo de falha alargamento de tubo. O mecanismo foi considerado por ser o mais comum de acordo com as estatísticas de ruptura de barragens. A Figura 0.56 apresenta a árvore de eventos e a Tabela 0.47 apresenta fatores de influência na probabilidade de formação de brecha - alargamento do tubo (modificado Foster & Fell, 2000 apud Fell et. al, 2005).

Árvores de Falhas 5

Formação do mecanismo de falha

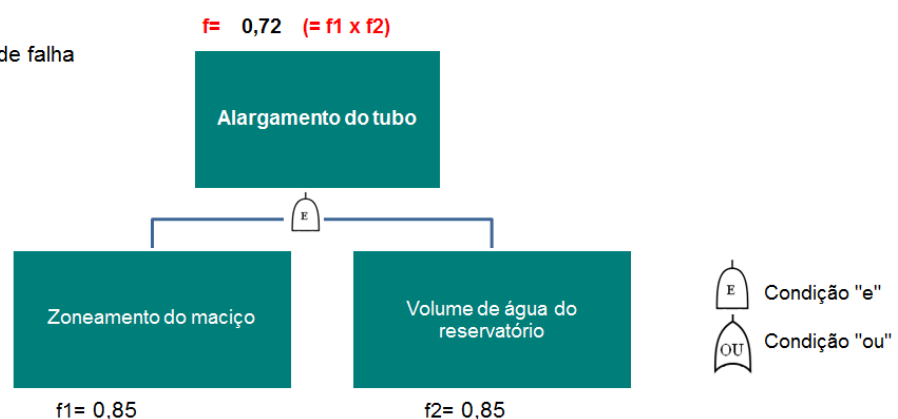


Figura 0.56 - Árvore de falhas 5 para o nó (f) da árvore de eventos.

Tabela 0.47 - Fatores de Influência na Probabilidade de Formação de Brecha - Alargamento do Tubo (modificado Foster & Fell, 2000 apud Fell et. al, 2005).

| Fator de influência | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|----------------------------------|--|---|--|--|
| Zoneamento do maciço | Seção Homogênea. Barragem zonada com zona de jusante capaz de suportar o teto do tubo | Barragem zonada, talude de jusante de areia ou pedregulho com finos | Barragem zonada com talude de jusante de pedregulho ou enrocamento | A ombreira em questão é homogênea e capaz de suportar o teto do tubo. |
| Volume de água armazenado | Elevado | - | Pequeno | Reservatório de 410.000,00 m ³ Sendo esse volume de água disponível suficiente para alimentar o tubo e formar a brecha.. |

CONSEQUENCIAS

A Tabela 0.48 apresenta a população atingida, conforme critério estabelecido no item 3.1 deste estudo.

Tabela 0.48 – População Atingida, Potencial de Perdas de Vidas e Danos Diretos da Barragem A.

| População Atingida * | Edificações Atingidas | Perda Potencial de Vidas * |
|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 83 | 34 | 10 |

Observa-se de 83 vítimas atingidas, 10 não teriam condições de saírem devido ao tempo de chegada da onda, sendo essas consideradas como perda potencial de vidas. Para o restante seria possível realizar a evacuação.

CÁLCULO DO RISCO

A maior probabilidade de ocorrência de falha para a barragem A foi a Erosão Interna, calculada em $6,00 \times 10^{-5}$. A consequência, considerando as perdas de vidas, obtida na mancha de inundação, foi mensurada em 10 vidas perdidas dentro da Zona de Autossalvamento. O produto destas duas informações plotado no gráfico da Figura 0.57, indicou que existe um risco que deve ser reduzido.

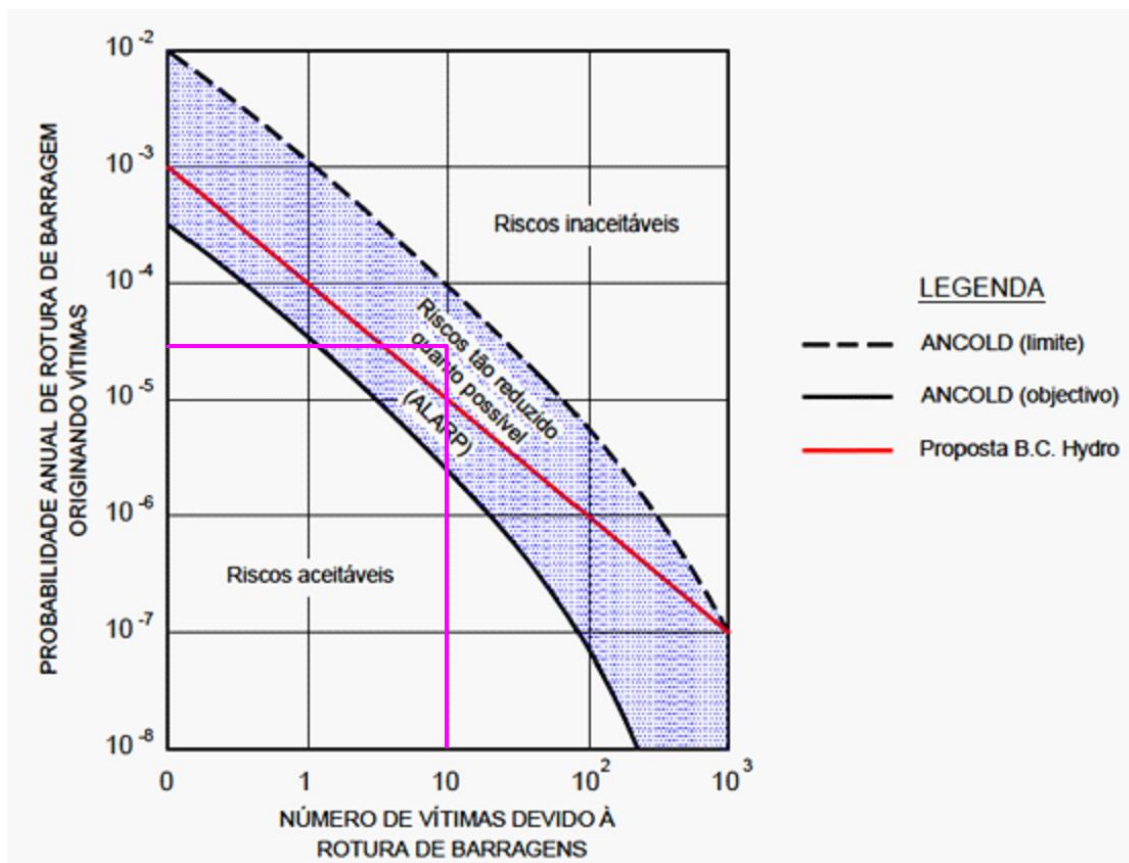


Figura 0.57 – Risco Aceitável da Barragem A.

AÇÕES PARA REDUZIR OS RISCOS DE FALHAS

De acordo com a Tabela 0.12, quando a barragem for classificada como “Risco a ser reduzido”, deverão ser implementadas melhorias imediatas na estrutura, reduzindo a probabilidade de ocorrência de um modo de falha. A sugestão para o caso da Barragem A, seria caracterizar melhor o sistema de drenagem interna, realizando ensaios de campo de perda d’água, realizando a coleta de amostras do sistema de drenagem interna, a fim de caracterizá-los e verificar o dimensionamento da estrutura. Caso o sistema esteja subdimensionado e houvesse surgência, a recomendação seria de um reforço da estrutura, aplicando-se uma bermas de equilíbrio com um novo sistema de drenagem interna.

BARRAGEM B

DESCRIÇÃO DA BARRAGEM

A Barragem B tem como principal finalidade o armazenamento dos rejeitos gerados pela planta de beneficiamento do Minério de Ferro.

O resumo das características referentes à ficha técnica da estrutura é apresentado na Tabela 0.49.

Tabela 0.49 - Ficha Técnica da Barragem B.

| DADOS GERAIS | |
|--|---|
| Nome da Estrutura: | Barragem B |
| Classificação: | Classe B da ANM |
| Finalidade: | Disposição de Rejeitos |
| Início de Operação Previsto: | 2018 |
| Final de Vida Útil: | - |
| Tipo de Seção: | Homogênea |
| Tipo de Fundação: | A fundação é composta por três diferentes tipos de solos residuais e saprólitos de filito (sericítico, grafitoso e quartzoso). |
| Curso de Água Barrado: | - |
| Método de Alçamento: | Etapa única |
| Volume Atual do Reservatório (m³): | 2.929.510,53 |
| Elevação Atual da Crista (m): | 1.120,00 |
| Comprimento da Crista (m): | 394 |
| Altura Máxima Atual (m): | 100 |
| Drenagem Interna: | O sistema de drenagem interna da Barragem B é composto por filtro vertical, tapete drenante nas ombreiras e dreno de leite no fundo do talvegue. O filtro vertical apresenta 1,0m de largura e o tapete drenante 0,80m de espessura, ambos compostos por areia. O dreno de leite apresenta seção drenante em transição grossa (brita 3) com área da seção transversal mínima de 6,50m ² . |
| Drenagem Superficial: | <ul style="list-style-type: none"> • Canaletas triangulares em concreto nas bermas; • Duas descidas d'água em degraus, situadas no contato maciço - ombreiras direita e esquerda, com seção retangular em concreto; • Uma bacia de dissipação de energia em concreto na extremidade de jusante da descida d'água em degraus da ombreira direita. A descida de água da ombreira esquerda deságua no trecho rápido do sistema extravasor. |
| Vertedouro | <ul style="list-style-type: none"> • Canal de aproximação: concebido em concreto armado, com geometria retangular, composto pelo emboque do sistema extravasor operacional e um trecho de transição para o canal rápido; • Canal rápido concebido em concreto armado, com geometria retangular, possui seu fundo constituído por trechos em degraus, onde a topografia apresentar altas declividades, de forma a auxiliar na dissipação da energia do fluxo de água e trecho sem degraus; • Bacia de dissipação concebida em concreto armado e implantada na extremidade de jusante do sistema extravasor, com o objetivo de minimizar a energia do fluxo de água e a ocorrência de processos erosivos no trecho de restituição ao talvegue natural. |

A seção típica em estudo, referente ao projeto *As Built*, é apresentada na Figura 0.58.

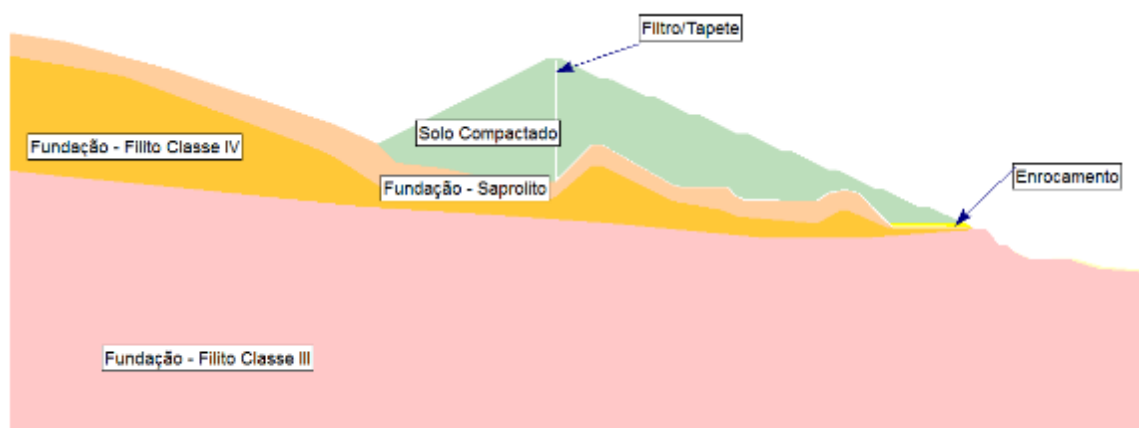


Figura 0.58 - Seção Geológica – Barragem B.

CÁLCULO DA PROBABILIDADE DOS MODOS DE FALHAS

- MODO DE FALHA GALGAMENTO

Na Tabela 0.50 são apresentados os parâmetros geomorfológicos para a bacia de contribuição delimitada e na Tabela 0.51 a ponderação do CN de acordo com os usos do solo definidos.

Tabela 0.50 - Parâmetros Geomorfológicos da bacia considerada.

| Estrutura | Área de Drenagem (km ²) | Número de Curva Ponderado (CN II) | Abstração Inicial (mm) | Tempo de Concentração (min) | Lag-time (min) |
|------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|-----------------------------|----------------|
| Barragem B | 1,06 | 65,0 | 27,3 | 41,6 | 25,0 |

Tabela 0.51 - Ponderação do número de curva das bacias de contribuição da barragem B, para condição de umidade antecedente tipo II.

| Uso e ocupação do solo | CN | Área (km ²) | CN ponderado |
|-------------------------|-----|-------------------------|--------------|
| Floresta condições boas | 52 | 0,144 | 65,0 |
| Campos condições ruins | 66 | 0,748 | |
| Áreas de Cultivo | 62 | 0,008 | |
| Praia de Rejeitos | 72 | 0,156 | |
| Espelho de Água | 100 | 0,002 | |

O volume de amortecimento de cheia representa o volume alocado entre a soleira do sistema extravasor e a crista da barragem.

A partir da base topográfica, foi possível a definição da curva cota-área-volume apresentada na Figura 0.59. As condições adotadas estão apresentadas na Tabela 0.52. A Tabela 0.53 e a Figura 0.60 mostram a curva cota-volume do reservatório, sendo todos esses volumes acumulados.

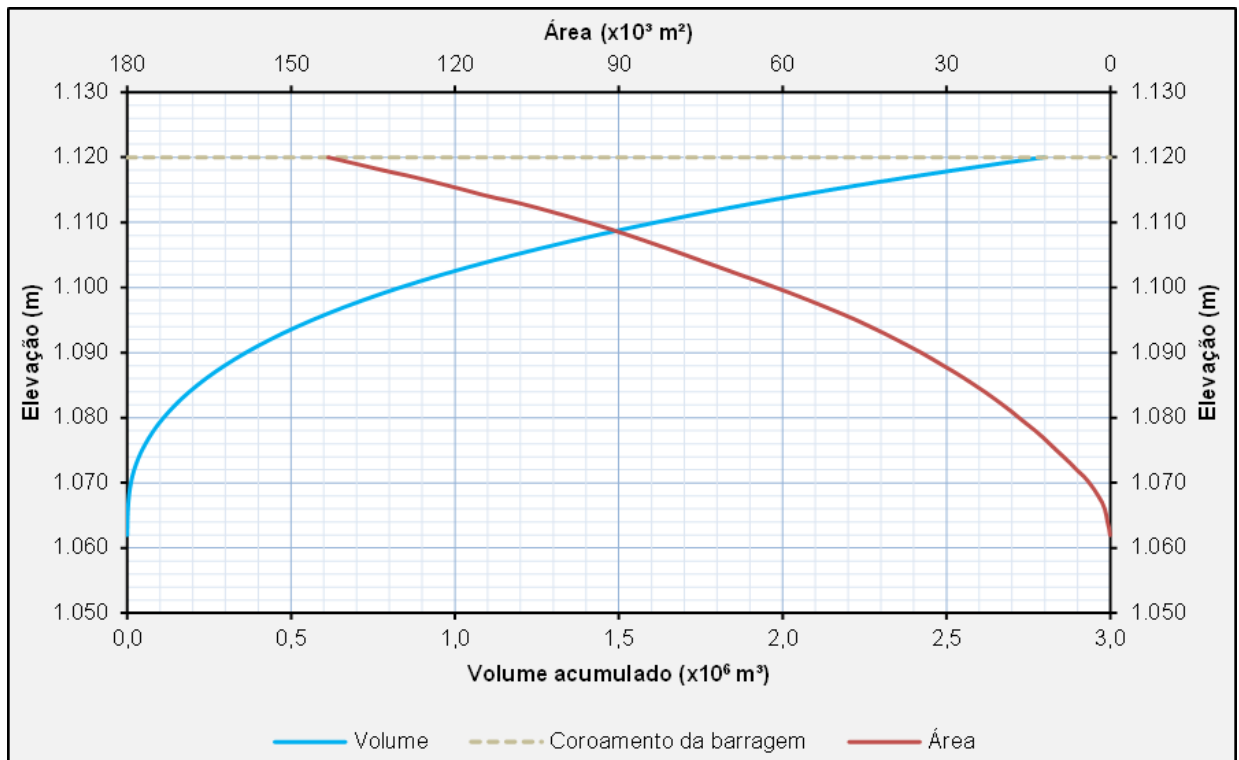


Figura 0.59 - Curva cota-volume do reservatório da barragem B.

Tabela 0.52 - Condições consideradas no lançamento de rejeitos.

| Estrutura | Variáveis | Sistema Extravasor Operacional |
|------------|-------------|--------------------------------|
| Barragem B | Crista (m) | 1.120,00 |
| | Soleira (m) | 1.117,50 |

Tabela 0.53 - Curvas cota-volume da barragem B.

| Cota (m) | Volume (m³) | | |
|----------|----------------|---------------|-----------|
| | Rejeito + Água | Amortecimento | Total |
| 1.062 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 1.065 | 1.138 | 0,00 | 1.138 |
| 1.070 | 11.192 | 0,00 | 11.192 |
| 1.075 | 44.982 | 0,00 | 44.982 |
| 1.080 | 110.712 | 0,00 | 110.712 |
| 1.085 | 213.758 | 0,00 | 213.758 |
| 1.090 | 361.793 | 0,00 | 361.793 |
| 1.095 | 563.909 | 0,00 | 563.909 |
| 1.100 | 832.381 | 0,00 | 832.381 |
| 1.105 | 1.180.111 | 0,00 | 1.180.111 |
| 1.110 | 1.612.205 | 0,00 | 1.612.205 |
| 1.115 | 2.144.733 | 0,00 | 2.144.733 |
| 1.117 | 2.390566 | 0,0 | 2.390566 |
| 1.117,5 | 2.455.764 | 0,00 | 2.455.764 |
| 1.118 | 2.455.764 | 65.198 | 2.520.962 |
| 1.119 | 2.455.764 | 200.802 | 2.656.566 |
| 1.120 | 2.455.764 | 341.446 | 2.797.210 |

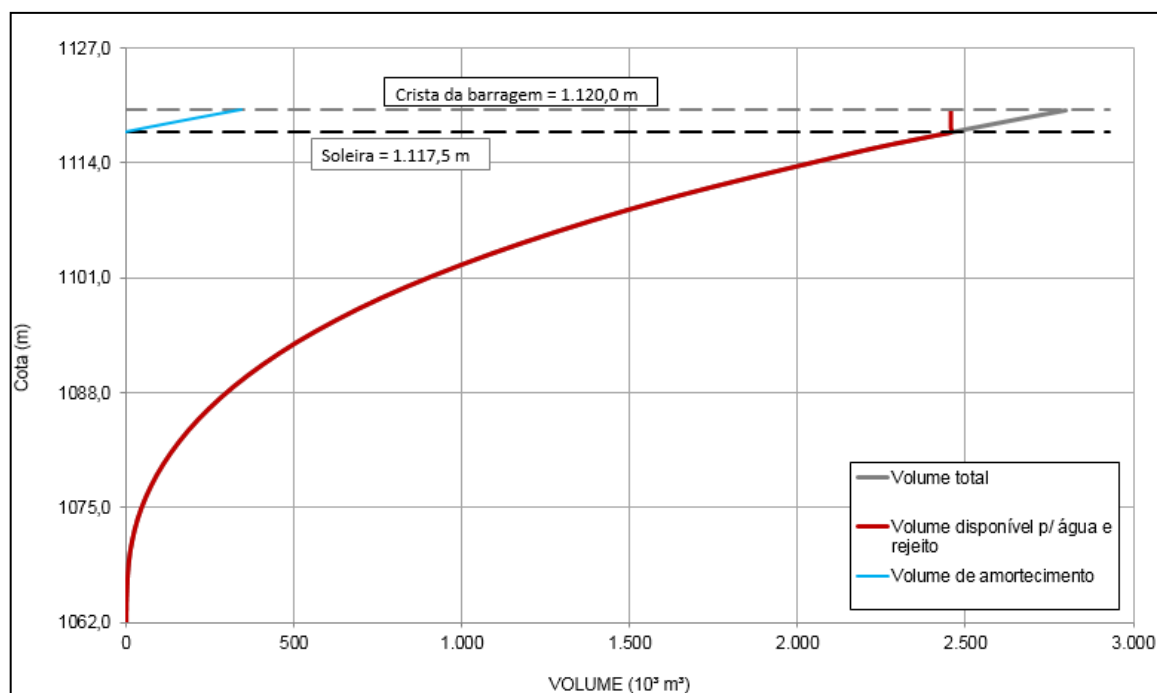


Figura 0.60 - Curva cota-volume da barragem B.

O sistema extravasor possui seção retangular e revestimento em concreto. Seu dimensionamento foi realizado para garantia de vertimento das cheias de projeto obtidas da EMP – Enchente Máxima Provável, gerada pela PMP – Precipitação Máxima Provável, considerando uma borda livre mínima de 1,0 m. As alturas pluviométricas utilizadas como base foram as precipitações apresentadas em Pinheiro (2011), para a mina na qual se localiza a barragem.

Com soleira na El. 1117,50 m o emboque foi concebido com seção retangular, em concreto armado com 2,00 m de base e 2,50 m de altura.

Para verificação da capacidade de vertimento do sistema extravasor da barragem B, frente a cheias extremas, considerou-se a curva de descarga apresentada na Figura 0.61.

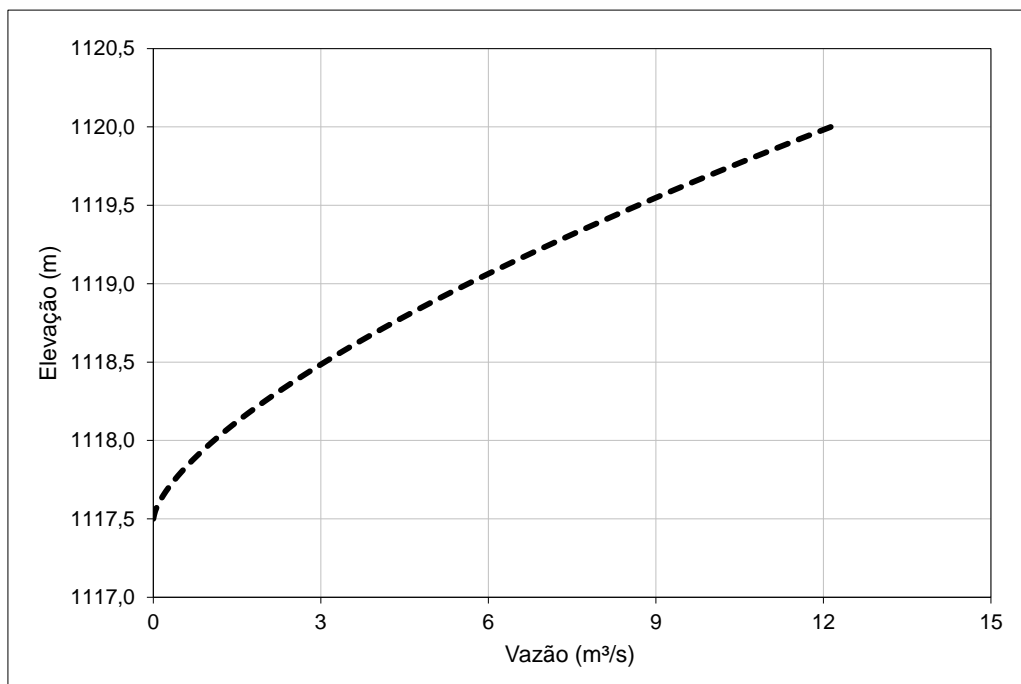


Figura 0.61 - Curva de descarga do sistema extravasor da barragem B.

Para o cálculo da probabilidade de galgamento da barragem B foi considerada a relação precipitação-duração-frequência (PDF) da região.

Para a obtenção das alturas de precipitação de tempos de retorno acima de 10.000 anos foi realizada a metodologia presente em Pinheiro (2011) até o limite da Precipitação Máxima Provável (PMP). Essa metodologia se baseia na equação 4.1:

$$\hat{P}_{T,d,i} = 0,0540 \cdot d^{0,4954} \cdot PMA_i^{1,0071} \cdot p_{T,d} \quad 1 \leq d \leq 30 \quad (4.1)$$

A Tabela 0.54 apresenta a relação PDF obtida para cada um dos tempos de retorno.

Tabela 0.54 - Relação precipitação-duração-frequência.

| Duração | Precipitação (mm) | | | | | | | |
|----------|-------------------------|------|--------|---------|---------|--------|---------|-------|
| | Tempo de retorno (anos) | | | | | | | |
| | 500 | 1000 | 10.000 | 30.000 | 50.000 | 80.000 | 100.000 | PMP |
| 15 min | 49,6 | 52,6 | 62,5 | 62,44 | 64,28 | 65,9 | 66,7 | 77,7 |
| 20 min | 58 | 61,4 | 72,8 | 73,29 | 75,45 | 77,4 | 78,3 | 91,2 |
| 30 min | 69,8 | 73,9 | 87,3 | 88,15 | 90,74 | 93,1 | 94,2 | 109,7 |
| 1 hora | 90,1 | 95,2 | 112 | 114,27 | 117,63 | 120,7 | 122,1 | 142,2 |
| 2 horas | 120 | 128 | 152 | 172,76 | 179,04 | 184,8 | 187,6 | 211,9 |
| 3 horas | 138 | 147 | 176 | 197,45 | 204,65 | 211,3 | 214,4 | 242,1 |
| 4 horas | 150 | 160 | 193 | 215,32 | 223,18 | 230,4 | 233,8 | 264 |
| 6 horas | 168 | 179 | 216 | 239,63 | 248,41 | 256,5 | 260,3 | 293,8 |
| 8 horas | 181 | 193 | 233 | 257,2 | 266,64 | 275,3 | 279,4 | 315,3 |
| 10 horas | 190 | 203 | 246 | 265,96 | 275,46 | 284,2 | 288,3 | 326,8 |
| 12 horas | 198 | 212 | 256 | 279,09 | 289,36 | 298,8 | 303,3 | 342 |
| 18 horas | 216 | 231 | 280 | 304,84 | 316,06 | 326,38 | 331,28 | 373,6 |
| 24 horas | 228 | 244 | 297 | 323,95 | 335,87 | 346,8 | 352 | 397 |
| 2 dias | 298 | 319 | 388 | 424,25 | 440,02 | 454,5 | 461,4 | 447 |
| 3 dias | 363 | 388 | 472 | 516,09 | 535,22 | 552,8 | 561,2 | 520 |
| 5 dias | 463 | 495 | 602 | 657,73 | 682 | 704,3 | 714,9 | 666 |
| 7 dias | 545 | 582 | 707 | 772,67 | 801,11 | 827,3 | 839,7 | 902 |
| 10 dias | 643 | 687 | 833 | 909,99 | 943,29 | 973,9 | 988,5 | 1002 |
| 15 dias | 794 | 849 | 1031 | 1126,14 | 1167,57 | 1205,7 | 1223,8 | 1139 |
| 20 dias | 906 | 968 | 1174 | 1282,04 | 1328,93 | 1372,1 | 1392,6 | 1395 |
| 30 dias | 1085 | 1158 | 1401 | 1527,72 | 1582,95 | 1633,8 | 1657,9 | 1607 |

A simulação do sistema hidrológico foi realizada com os parâmetros e métodos apresentados para todas as durações de chuvas e tempos de retorno considerados. Com isso, procurou-se identificar a duração crítica do sistema, ou seja, a duração do evento pluviométrico responsável pela ocorrência do galgamento do maciço ou pela maior sobrelevação do nível d'água no reservatório.

A Tabela 0.55 apresenta os resultados das simulações para os diferentes tempos de retorno em relação à duração crítica.

Tabela 0.55 - Resultados do trânsito de cheia para as durações críticas.

| Variável | Tempo de retorno (anos) | | | | | | | |
|--|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 500 | 1000 | 10.000 | 30.000 | 50.000 | 80.000 | 100.000 | PMP |
| Duração crítica | 3 dias | 3 dias | 3 dias | 3 dias | 3 dias | 3 dias | 3 dias | 18h |
| Vazão Máxima Afluente (m ³ /s) | 2,67 | 2,9 | 3,72 | 4,51 | 4,34 | 4,51 | 4,59 | 10,97 |
| Vazão Máxima Defluente (m ³ /s) | 1,9 | 2,11 | 2,84 | 3,24 | 3,41 | 3,57 | 3,65 | 4,18 |
| Elevação NA Máx Maximorum (m) | 1118,23 | 1118,28 | 1118,45 | 1118,54 | 1118,57 | 1118,61 | 1118,62 | 1118,73 |
| Borda Livre disponível (m) | 1,77 | 1,72 | 1,55 | 1,46 | 1,43 | 1,39 | 1,38 | 1,27 |

A Tabela 0.56 e a Figura 0.62 apresentam os resultados da simulação hidrológica decorrente da passagem da Cheia Máxima Provável (CMP) pelo reservatório da barragem B.

Tabela 0.56 - Resultados do trânsito de cheias no reservatório da barragem B.

| Barragem | Precipitação Máxima Provável | | | | | | |
|----------|------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|---------------------|------------|-----------------|
| | Duração crítica | Vazão afluente (m ³ /s) | Vazão defluente (m ³ /s) | Elevação soleira (m) | Elevação crista (m) | NA máx (m) | Borda livre (m) |
| B | 18 horas | 10,97 | 4,18 | 1117,5 | 1120,0 | 1118,73 | 1,27 |

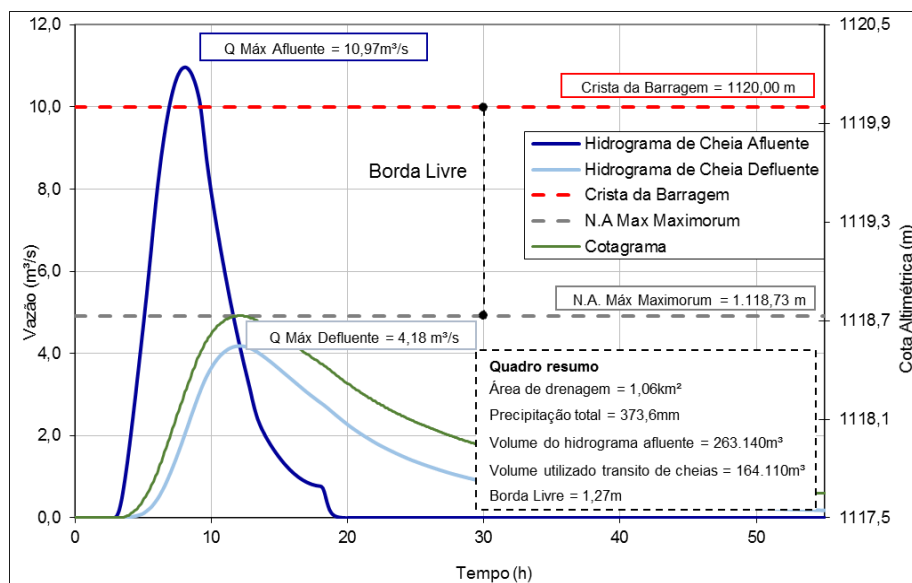


Figura 0.62 - Resultados do trânsito de cheias no reservatório da barragem B (PMP e duração crítica de 18 horas).

Os estudos indicaram que não há galgamento da estrutura nestas condições, com borda livre de 1,27m.

Entende-se que a probabilidade de galgamento da barragem é desprezível. Nesse caso, as diretrizes metodológicas estabelecem que a probabilidade de ruptura seja considerada igual a 1×10^{-8} .

- MODO DE FALHA INSTABILIZAÇÃO

- DEFINIÇÃO DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO E REALIZAÇÃO DE ANÁLISE DETERMINÍSTICA;

A geometria utilizada para as análises de estabilidade é apresentada na Figura 0.63, correspondente à seção principal da barragem, ou seja, a seção transversal de máxima altura, obtida no Projeto *As Built*.

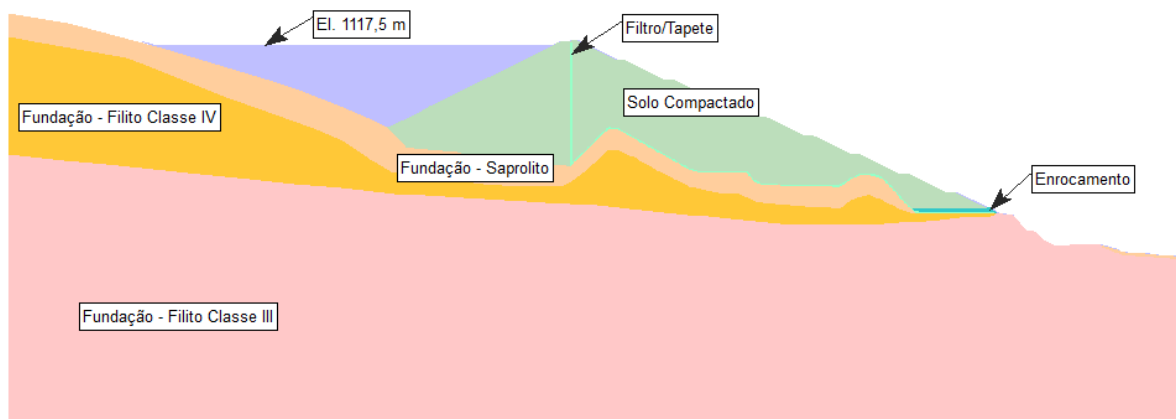


Figura 0.63 - Modelo para as análises de estabilidade – Barragem B.

- Parâmetros Geotécnicos

Os parâmetros para os materiais que compõem o modelo foram determinados com base na média nos ensaios de laboratórios realizados durante a execução das obras e, também, durante

a elaboração do projeto detalhado (Tabela 0.57).

Tabela 0.57 – Parâmetros Médios – Barragem B.

| MATERIAIS | Peso Específico (kN/m ³) | Coesão Efetiva (kPa) | Ângulo de Atrito Efetivo (°) | Coefficiente de Permeabilidade (m/s) |
|----------------------|--------------------------------------|----------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| Solo Compactado | 20 | 39,5 | 27,9 | 4 x 10 ⁻⁸ |
| Filtro/Tapete | 21 | 0 | 30 | 1 x 10 ⁻⁴ |
| Fundação (Saprolito) | 18 | 15,9 | 33,4 | 1 x 10 ⁻⁷ |
| Filito Classe IV | 20 | 90 | 33 | 8 x 10 ⁻⁷ |
| Filito Classe III | 22 | 250 | 38 | 8 x 10 ⁻⁷ |
| Enrocamento | 22 | 0 | 35 | 1 |

- Níveis Piezométricos

Para o modo de falha **instabilização** serão realizados estudos de dois cenários distintos, sendo eles:

- **Cenário 1:** condição normal de operação.

Reservatório com nível d'água na soleira do vertedouro da barragem (El. 1.117,50m), após a finalização do enchimento do reservatório (Figura 0.64).

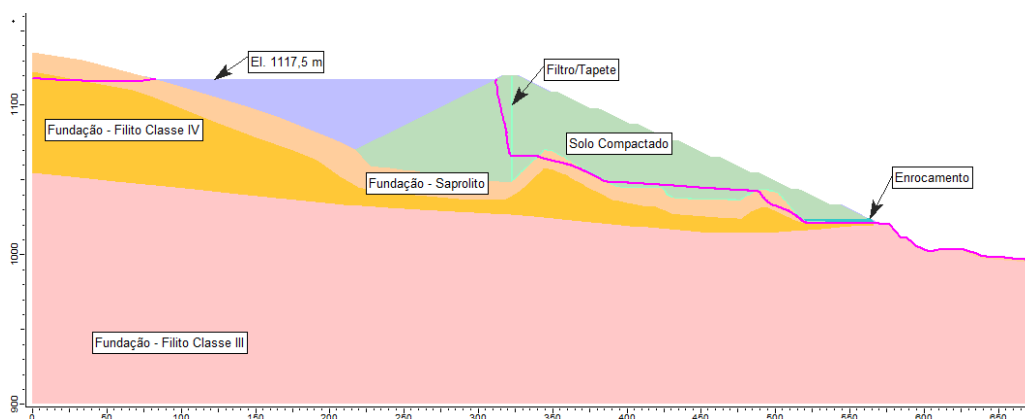


Figura 0.64 - Modelo para as análises de estabilidade – Cenário 1.

- **Cenário 2:** condição crítica hipotética.

Reservatório com nível d'água na soleira do vertedouro da barragem (El. 1.117,50m), foi considerada a ineficiência do sistema de drenagem interna para avaliação do comportamento da freática frente a uma possível colmatagem. A Figura 0.65 apresenta a condição crítica da operação.

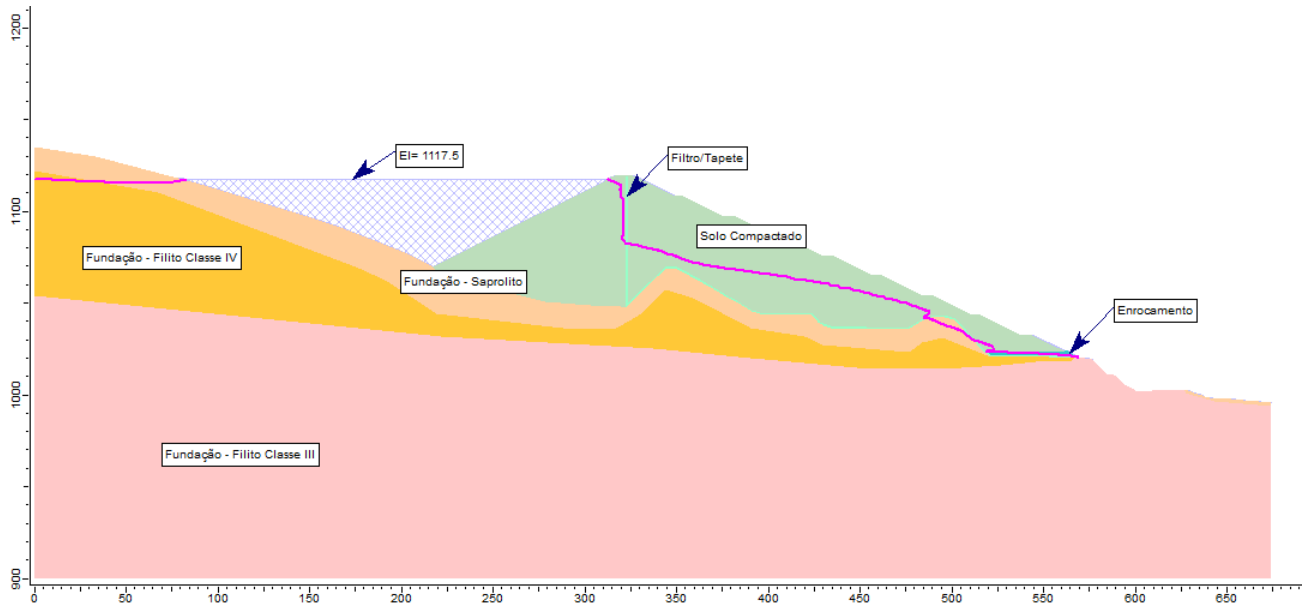


Figura 0.65 - Modelo para as análises de estabilidade – Cenário 2.

A definição da freática para ambos os cenários são resultados de análises de percolação, visto que a barragem está na sua fase inicial de operação, e, portanto, a maioria da instrumentação de controle encontra-se seca, impossibilitando assim descrever a situação operacional da estrutura.

Os resultados do cenário 1 de piezometria é apresentado na Figura 0.66 que representa a carga hidráulica total.

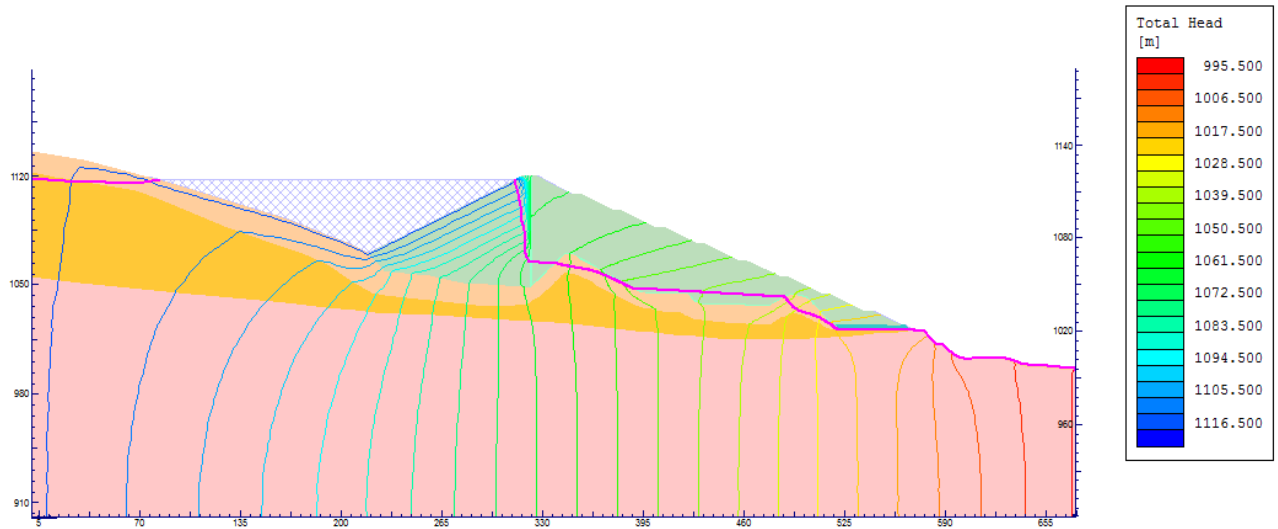
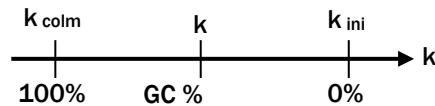


Figura 0.66 - Análise de percolação para o Cenário 1: carga hidráulica total (m).

A piezometria do cenário 2 foi definida a partir da determinação do Grau de Colmatação (GC) dos sistemas de drenagem interna, conforme equação 4.2:

$$GC = \frac{\log(k_{ini}) - \log(k)}{\log(k_{ini}) - \log(k_{colm})} \quad (4.2)$$



O grau de colmatação é um estudo comparativo das permeabilidades máximas e mínimas em escala logarítmica. Nesse sentido, o k_{colm} configura-se como coeficiente de permeabilidade do material colmatado e k_{ini} representa o coeficiente de permeabilidade inicialmente adotado. Na situação em estudo, igualou-se o parâmetro de permeabilidade do sistema de drenagem interna ao do solo compactado.

Para a compactação parcial do sistema de drenagem interna, adotou-se $GC=50\%$. O resultado desse cenário pode ser observado na Figura 0.67 que representa a carga hidráulica do cenário 2. Na Tabela 0.58 podem ser observados os coeficientes de permeabilidade e os graus de colmatação do sistema de drenagem interna.

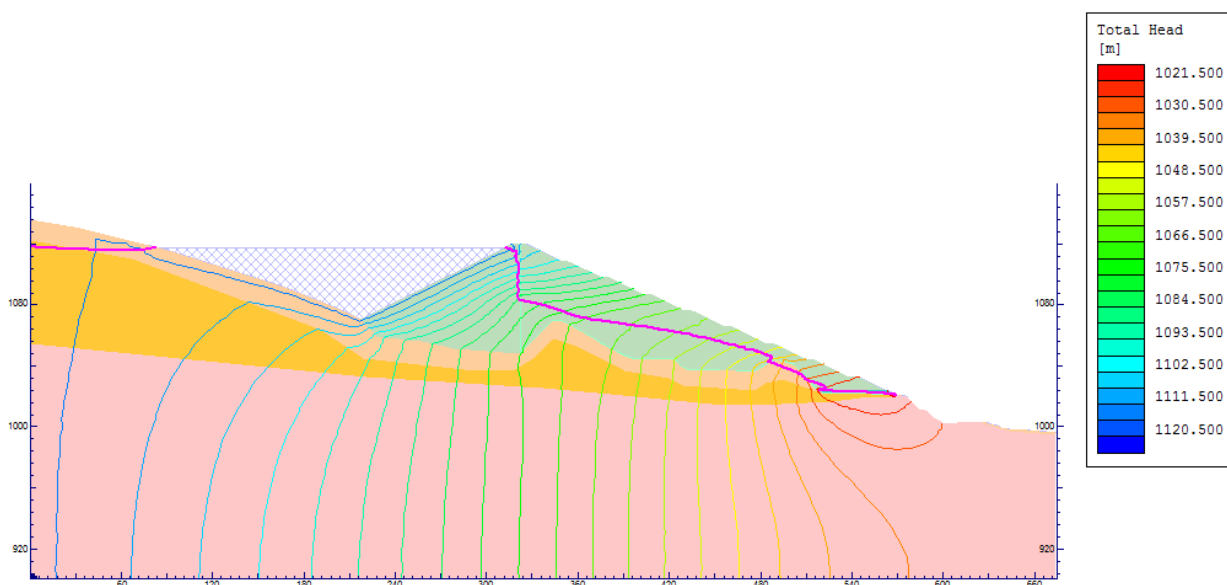


Figura 0.67 - Análise de percolação para o Cenário 2: carga hidráulica total (m).

Tabela 0.58 - Coeficientes de permeabilidade e Graus de Colmatação do sistema de drenagem interna.

| Sistema de drenagem interna | Inicial | | Cenário 1 | | Cenário 2 | | Colmatado | |
|-----------------------------|--------------------|--------|--------------------|--------|--------------------|--------|--------------------|--------|
| | K (m/s) | GC (%) | K (m/s) | GC (%) | K (m/s) | GC (%) | K (m/s) | GC (%) |
| Filtro/Tapete | 1×10^{-4} | 0% | 1×10^{-4} | 0% | 2×10^{-6} | 50% | 4×10^{-8} | 100% |
| Enrrocamento | 1×10^0 | 0% | 1×10^0 | 0% | 2×10^{-4} | 50% | 4×10^{-8} | 100% |

- ANÁLISES DE ESTABILIDADE DETERMINÍSTICAS

As análises de estabilidade da Barragem B foram realizadas em condições de mobilização de resistências drenadas, considerando 02 cenários (**Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) que se diferenciam pela condição do nível freático no interior do maciço. Para a seleção preliminar dos parâmetros que influenciam o fator de segurança (FS), foi elaborada análise de estabilidade utilizando a seção apresentada e os parâmetros médios apresentados na Tabela 0.57. Nota-se que em todas as análises, Figura 0.68 e Figura 0.69, os materiais críticos (interceptados pelo círculo de ruptura) foram o Aterro, Saprolito e Filito Classe IV.

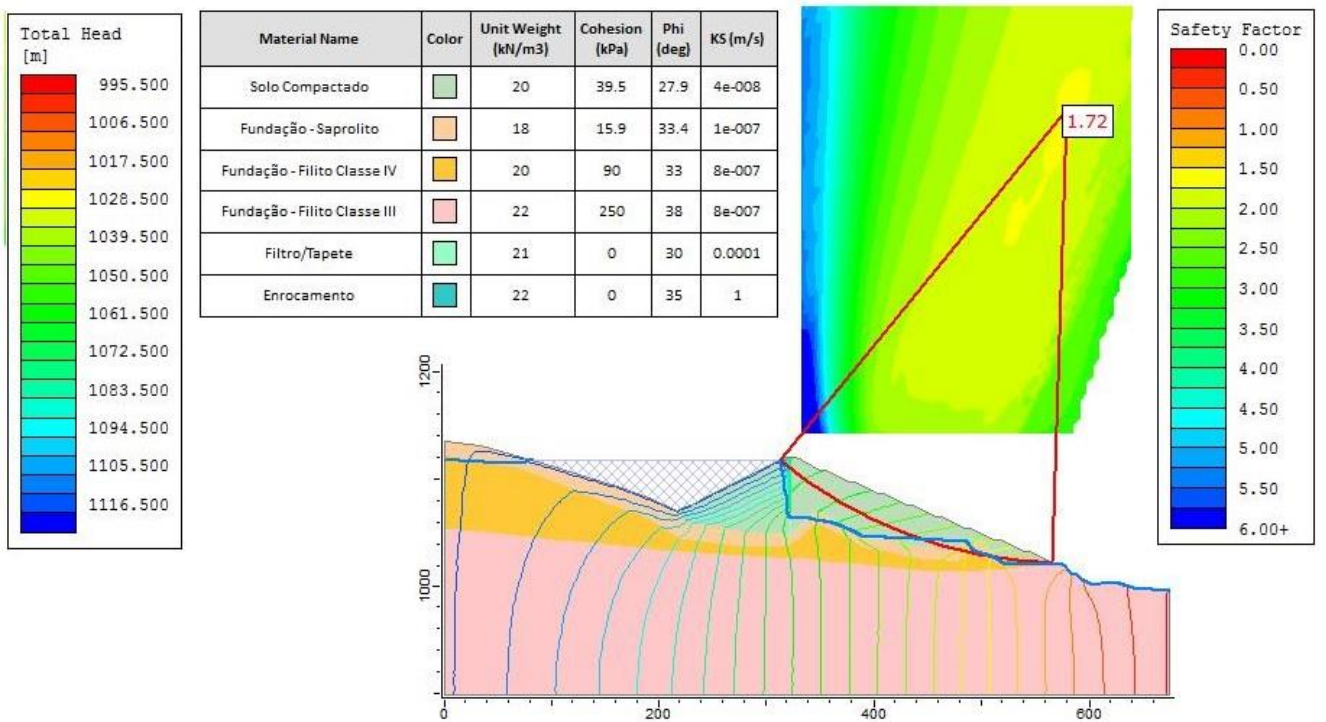


Figura 0.68 - Resultado da Análise de estabilidade determinística na Cenário 1 – Condição Normal de Operação.

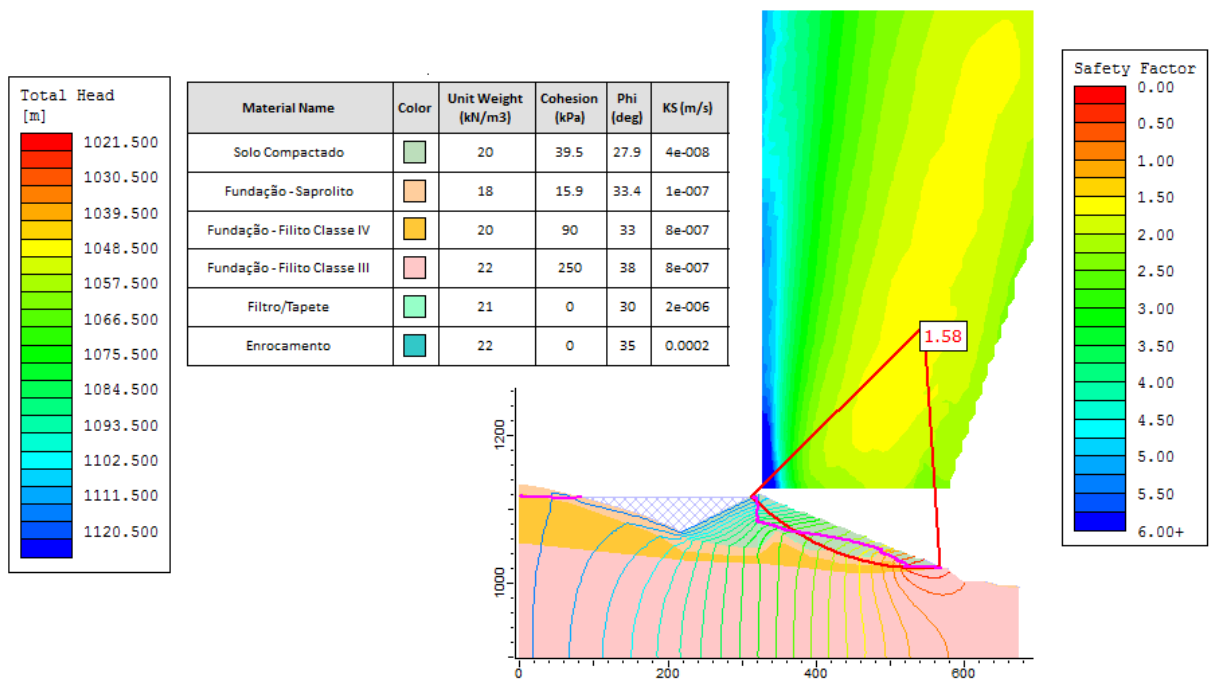


Figura 0.69 - Resultado da Análise de estabilidade determinística na Cenário 2 – Condição Crítica.

- VARIABILIDADE DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS

Conforme apresentado no item anterior, em todas as análises, os materiais críticos (interceptados pelo círculo de ruptura) foram o Aterro, Saprolito e Filito Classe IV. Para estes materiais, realizou-se uma análise estatística dos resultados de ensaios laboratoriais disponibilizados.

Para a camada de Saprolito, os ensaios foram compilados e analisados os a partir dos parâmetros p e q , obtidos nos ensaios triaxiais executados durante a implantação da estrutura. Posteriormente, foram realizadas análises buscando obter os valores médios (μ) e desvios-padrão (σ). Os parâmetros p e q das amostras são apresentados na Figura 0.70, que ilustra a dispersão dos dados ($R^2=0,6818$), já a Figura 0.71 apresenta a convergência dos valores após seu tratamento ($R^2=0,9547$).

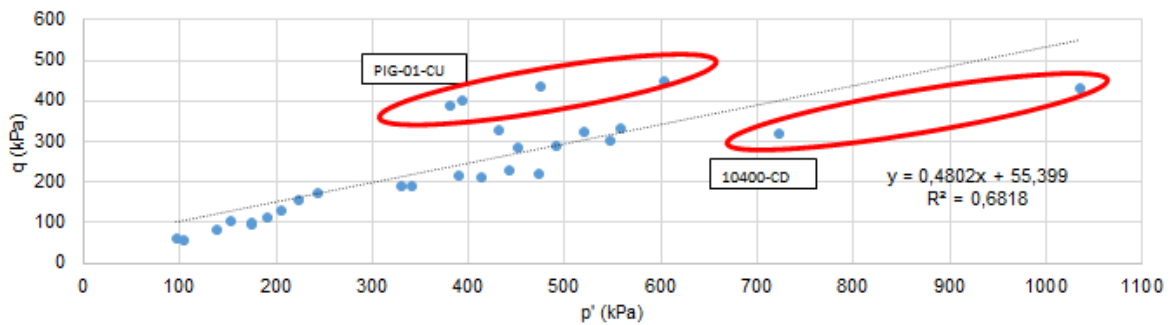


Figura 0.70 - Dispersão dos dados $p \times q$.

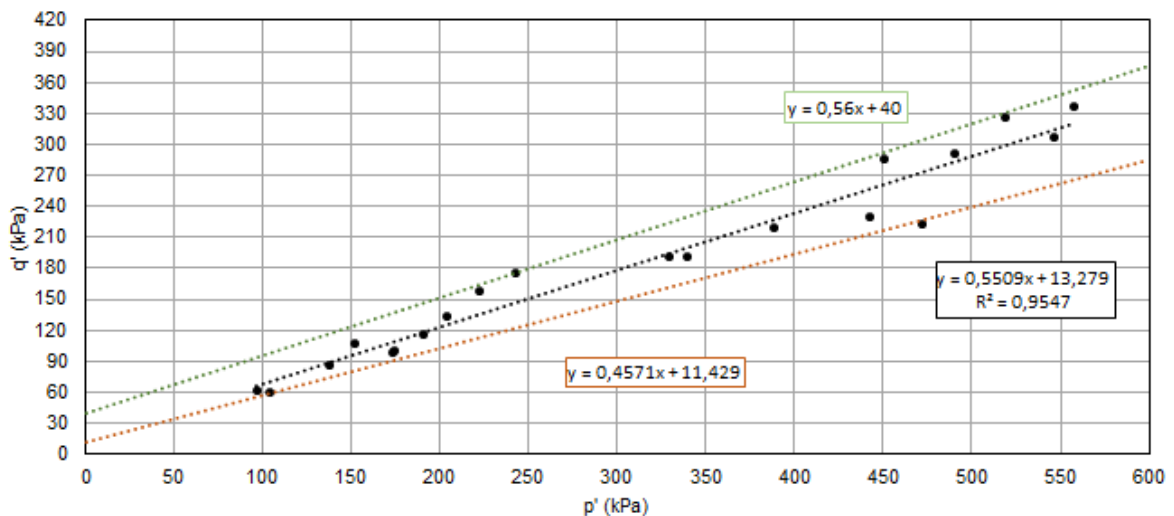


Figura 0.71 - Convergência dos dados $p \times q$.

As amostras destacadas de vermelho na Figura 0.70 foram desconsideradas nos cálculos estatísticos, uma vez que seus valores se encontravam discrepantes quando comparados aos outros. A partir dos dados apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, foi realizado o tratamento estatístico dos dados obtendo-se os valores médios (μ) e desvios-padrão (σ).

Para a camada do Aterro adotou-se procedimento semelhante buscando obter os valores médios (μ) e desvios-padrão (σ). Para Fundação (Filito Classe IV) adotou-se os valores de projeto como valores médios, calculando-se os desvios-padrão a partir da adoção de coeficientes de variação (CV) consagrados em literatura. Para tanto, adotou-se uma variabilidade de 60% para c' e 10% para ϕ' . Os resultados são apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Para os demais materiais, foram adotados os mesmos valores médios obtidos nos ensaios de laboratório executados em amostras indeformadas coletadas durante o projeto básico, detalhado e em obra.

Adotou-se a distribuição Normal de probabilidades para representar a ocorrência da variável aleatória ângulo de atrito efetivo, e a distribuição Log-normal para a coesão efetiva. A escolha da função densidade de probabilidade para melhor representação da variável aleatória foi baseada na Tabela 0.10 listada pela USACE(2006).

A Tabela 0.59 sintetiza os cálculos obtidos para variabilidade de parâmetros geotécnicos.

Tabela 0.59 - Variabilidade dos parâmetros geotécnicos.

| MATERIAIS | γ (kN/m ³) | c' (kPa) | Φ' (°) |
|--|----------------------------------|---------------------|-----------------|
| Solo Compactado ⁽¹⁾ | $\mu = 20,0$ | $\mu = 39,5$ | $\mu = 27,9$ |
| | | $\sigma = 9,8$ | $\sigma = 2,5$ |
| | | CV = 24,8% | CV = 9,0% |
| | | (distr. Log-normal) | (distr. Normal) |
| Fundação (Saprolito) ⁽²⁾ | $\mu = 18,0$ | $\mu = 15,9$ | $\mu = 33,4$ |
| | | $\sigma = 6,4$ | $\sigma = 3,3$ |
| | | CV = 40,3% | CV = 9,9% |
| | | (distr. Log-normal) | (distr. Normal) |
| Filito Classe IV | $\mu = 20,0$ | $\mu = 90,0$ | $\mu = 33,0$ |

| | | | |
|-------------------|--------------|---------------------|-----------------|
| | | $\sigma = 54,0$ | $\sigma = 3,3$ |
| | | CV = 60% | CV = 10% |
| | | (distr. Log-normal) | (distr. Normal) |
| Filtro/Tapete | $\mu = 21,0$ | $\mu = 0,0$ | $\mu = 30,0$ |
| Filito Classe III | $\mu = 22,0$ | $\mu = 250,0$ | $\mu = 38,0$ |
| Enrocamento | $\mu = 22,0$ | $\mu = 0,0$ | $\mu = 35,0$ |

- ANÁLISES PROBABILÍSTICAS

- MÉTODO DE FOSM

No método FOSM foram realizadas sete análises considerando-se, para os parâmetros geotécnicos (ângulo de atrito efetivo e coesão efetiva), os valores médios e os desvios-padrão apresentados na Tabela 0.23.

As análises de estabilidade, bem como os respectivos fatores de segurança obtidos, são apresentadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, Figura 0.72, Figura 0.73, Figura 0.74 , Figura 0.75, Figura 0.76 e Figura 0.77. Na Tabela 0.60 são apresentadas as contribuições de cada parâmetro e de cada material nas análises de estabilidade.

Tabela 0.60 - Parâmetros utilizados e resultados das análises de estabilidade.

| MATERIAL | PARÂMETRO ANALISADO | PARAMETRO UTILIZADO | F.S | dX_i | dFS_i | dFS_i/dX_i | $V[X_i]$ | $(dFS_i/dX_i)^2 \times V[X_i]$ | CONTRIBUIÇÃO | |
|------------------|--------------------------|------------------------------|-----|--------|---------|--------------|----------|--------------------------------|--------------|--------|
| Solo Amarelado | Coesão efetiva | $\gamma = 18,9\text{KN/m}^3$ | 2,3 | 2,4 | - | 0,02 | -0,0084 | 5,71 | 0,0004 | 1,10% |
| | | $c' = 26,29$ | | | | | | | | |
| | | $\phi' = 31,9$ | | | | | | | | |
| | Ângulo de atrito efetivo | $\gamma = 18,9\text{KN/m}^3$ | 2,3 | 3,2 | - | 0,04 | -0,0129 | 10,18 | 0,0017 | 4,70% |
| | | $c' = 23,90$ | | | | | | | | |
| | | $\phi' = 35,09$ | | | | | | | | |
| Solo Avermelhado | Coesão efetiva | $\gamma = 19\text{KN/m}^3$ | 2,3 | 2,1 | - | 0,04 | -0,0171 | 4,2 | 0,0012 | 3,50% |
| | | $c' = 22,55$ | | | | | | | | |
| | | $\phi' = 35,4$ | | | | | | | | |
| | Ângulo de atrito efetivo | $\gamma = 19$ | 2,4 | 3,5 | - | 0,18 | -0,0506 | 12,53 | 0,032 | 90,50% |
| | | $c' = 20,5$ | | | | | | | | |
| | | $\phi' = 38,94$ | | | | | | | | |
| Solo saprolítico | Coesão efetiva | $\gamma = 23,0\text{KN/m}^3$ | 2,2 | 0,5 | 0 | -0,0056 | 0,29 | 0 | 0,00% | |
| | | $c' = 5,89\text{KN/m}^2$ | | | | | | | | |
| | | $\phi' = 35,60$ | | | | | | | | |
| | Ângulo de atrito efetivo | $\gamma = 23,0\text{KN/m}^3$ | 2,3 | 3,6 | - | 0,01 | -0,002 | 12,67 | 0 | 0,10% |
| | | $c' = 5,35$ | | | | | | | | |
| | | $\phi' = 39,16^\circ$ | | | | | | | | |

A Seguir serão apresentadas as análises de estabilidades variando os parâmetros, considerando o cenário 1 e 2 (Figura 0.72, Figura 0.73, Figura 0.74, Figura 0.75, Figura 0.76, Figura 0.77, Figura 0.78, Figura 0.79, Figura 0.80, Figura 0.81, Figura 0.82, Figura 0.83 e Figura 0.84.

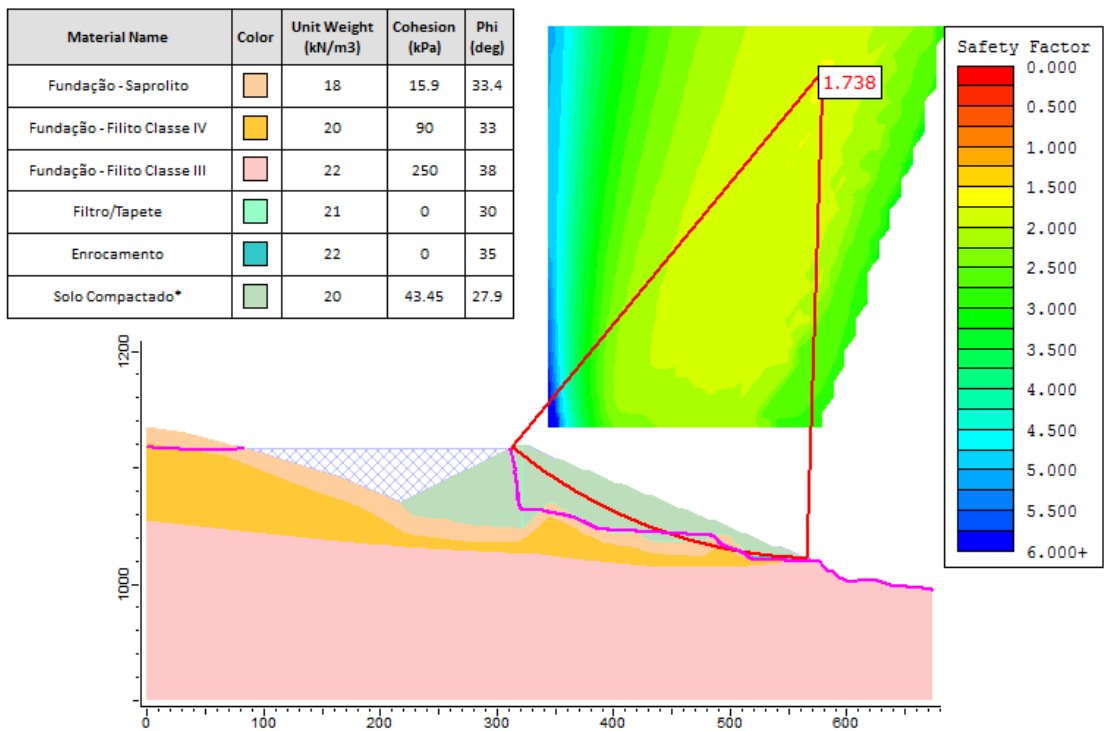


Figura 0.72 - Acréscimo de 10% da coesão no solo compactado – Cenário 1.

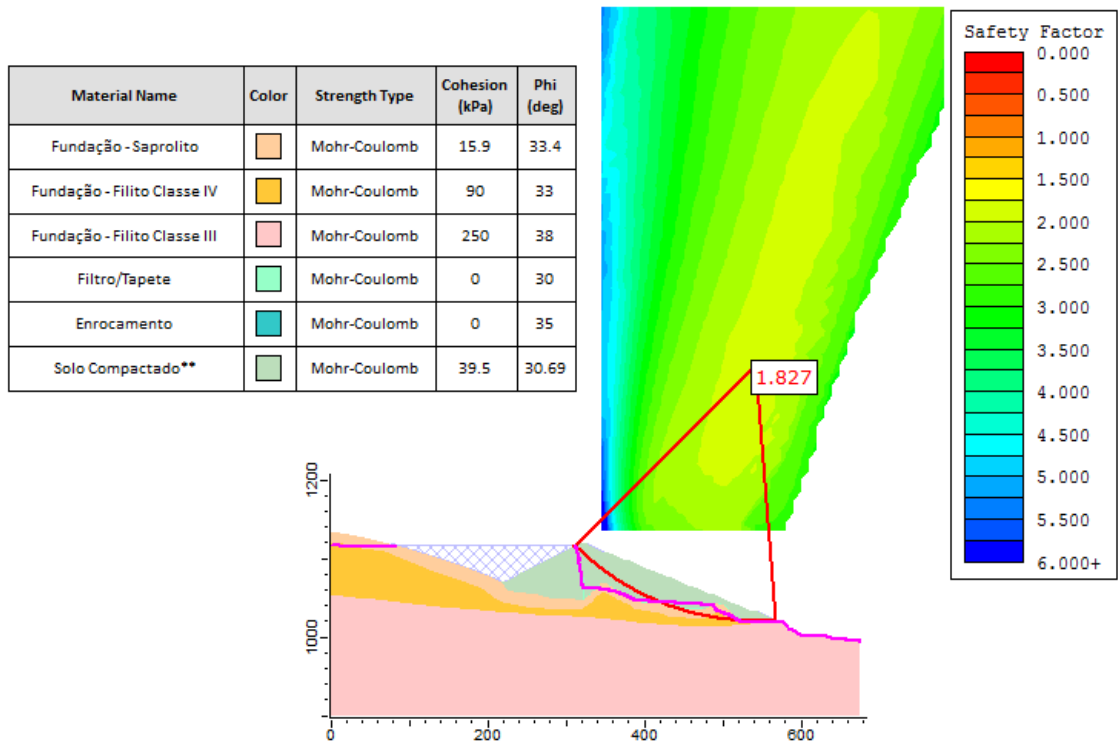


Figura 0.73 - Acréscimo de 10% no ângulo de atrito do solo compactado – Cenário 1.

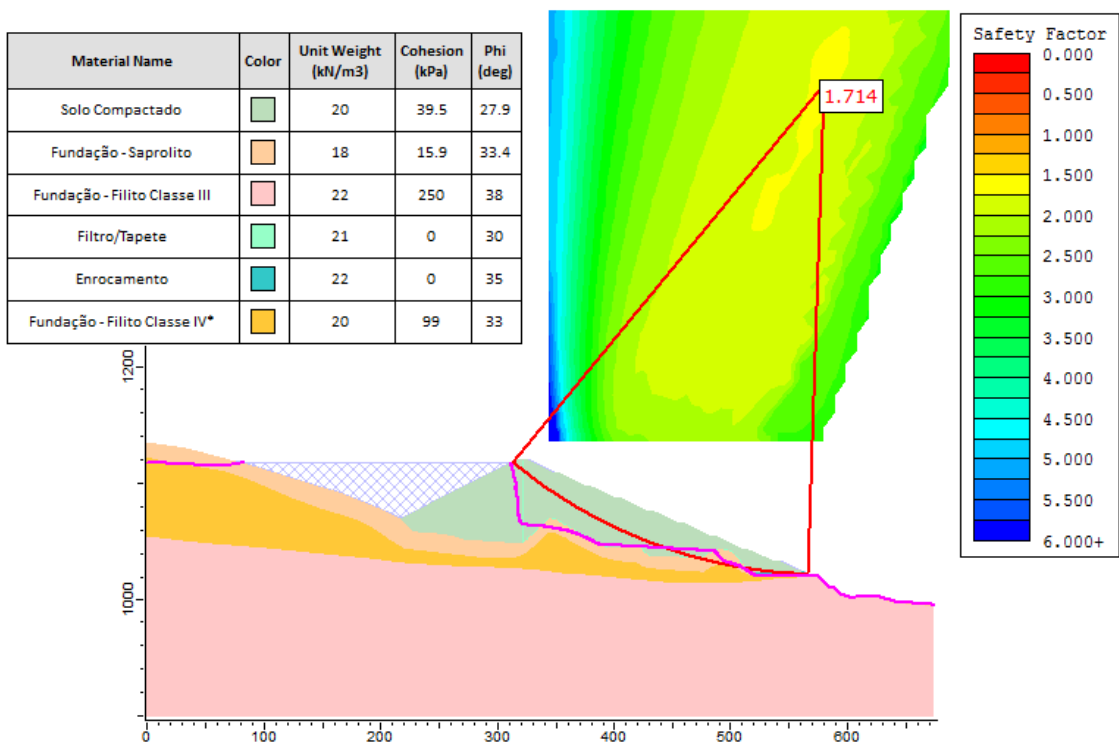


Figura 0.74 - Acréscimo de 10% da coesão do Filito Classe IV – Cenário 1.

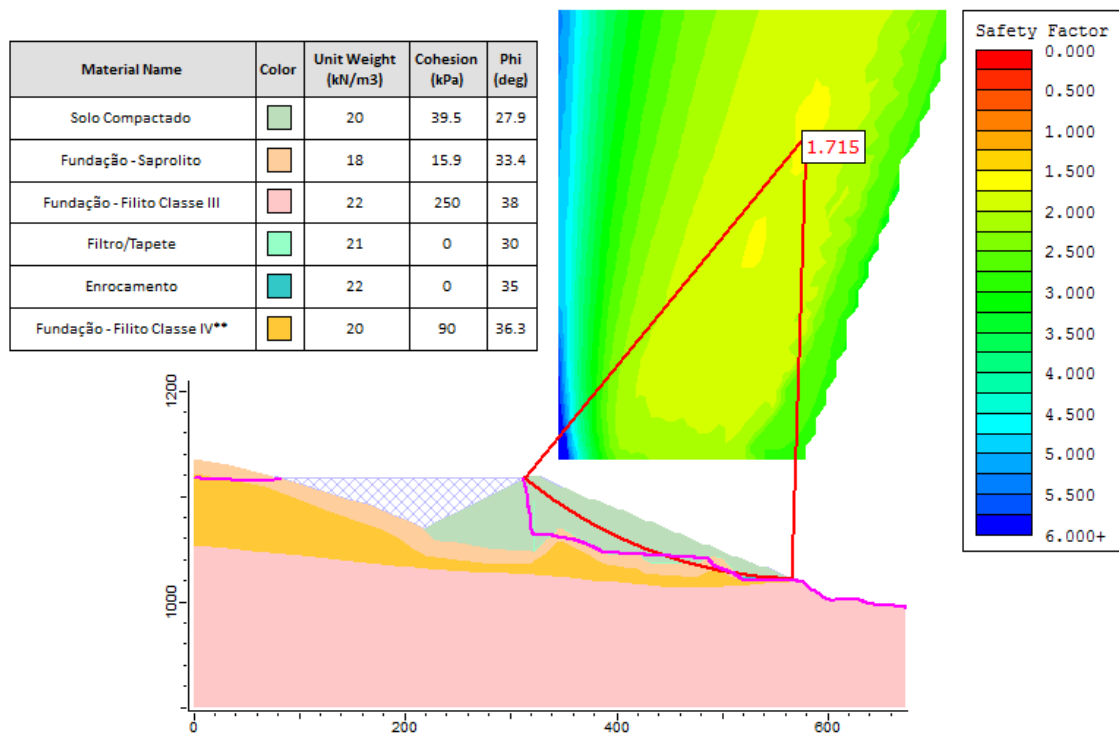


Figura 0.75 - Acréscimo de 10% da coesão do ângulo de atrito Classe IV – Cenário 1

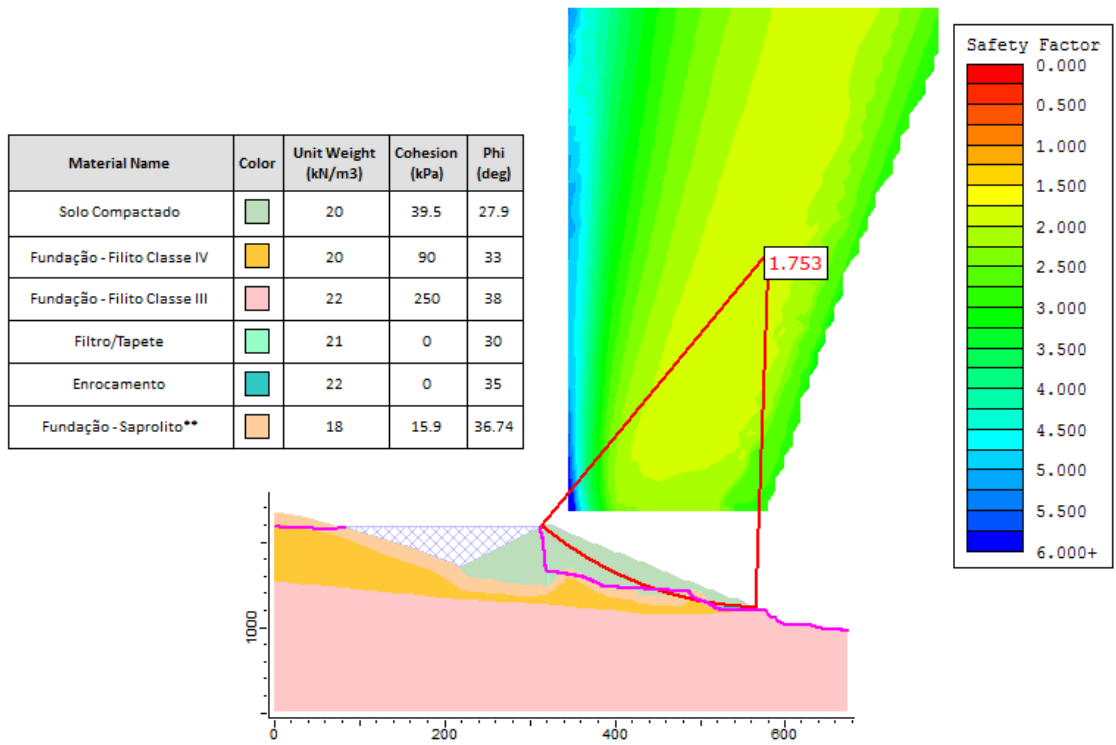


Figura 0.76 - Acréscimo de 10% no ângulo de atrito do saprolito – Cenário 1.

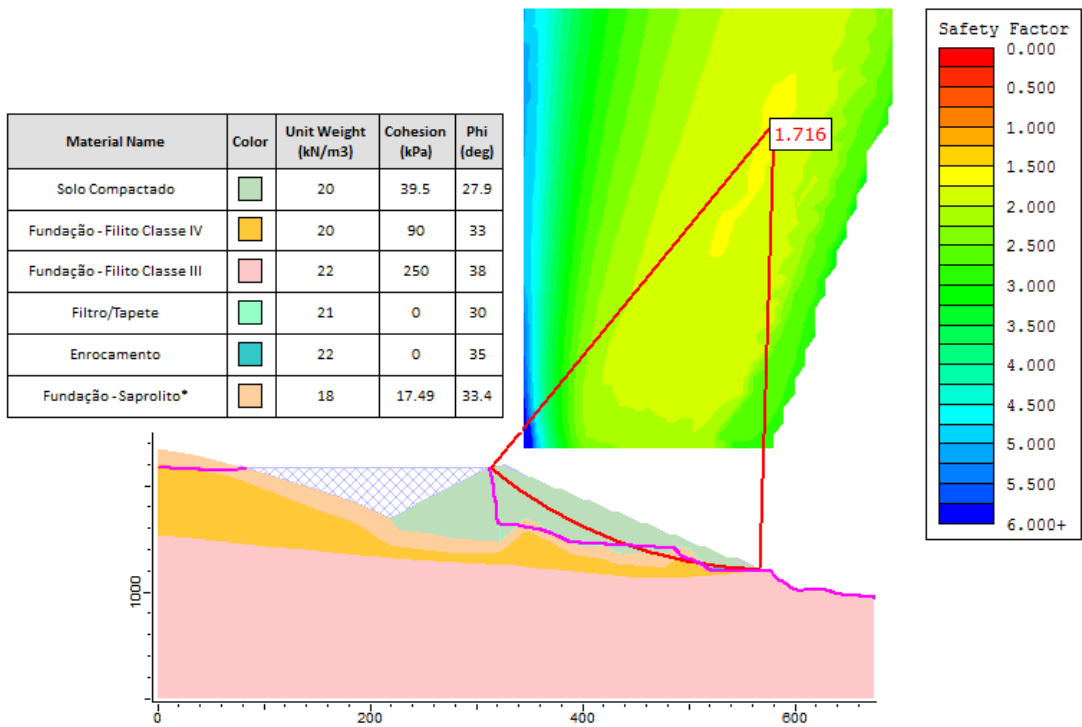


Figura 0.77 - Acréscimo de 10% da coesão do Saprolito – Cenário 1

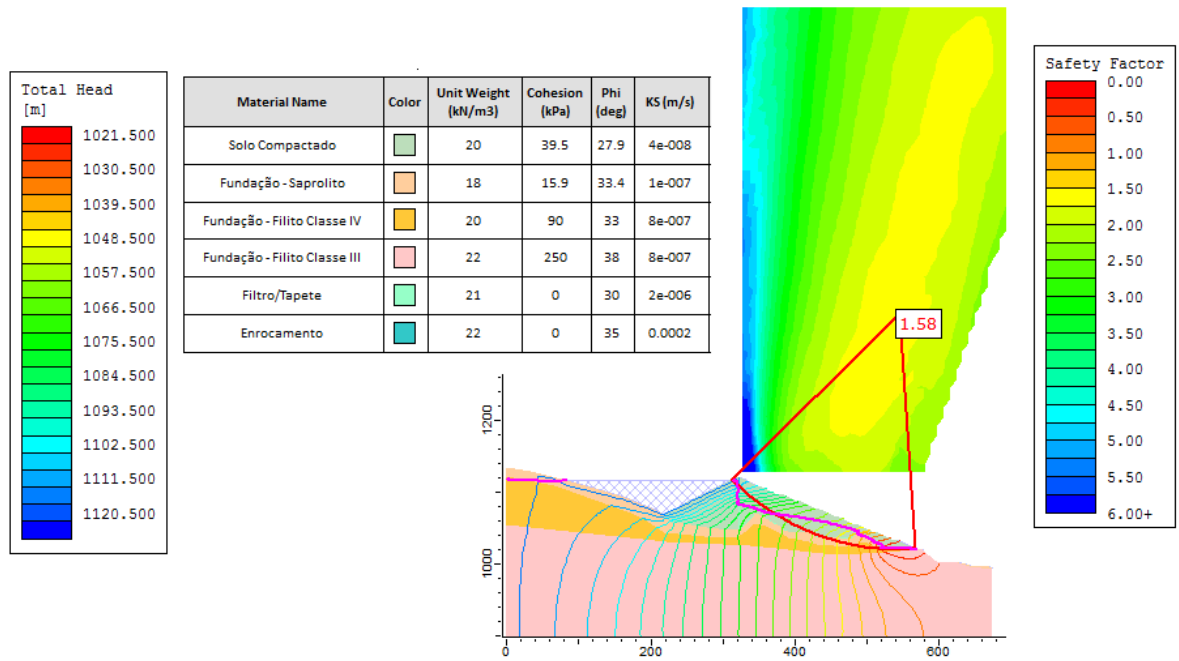


Figura 0.78 - Parâmetros médios – Cenário 2.

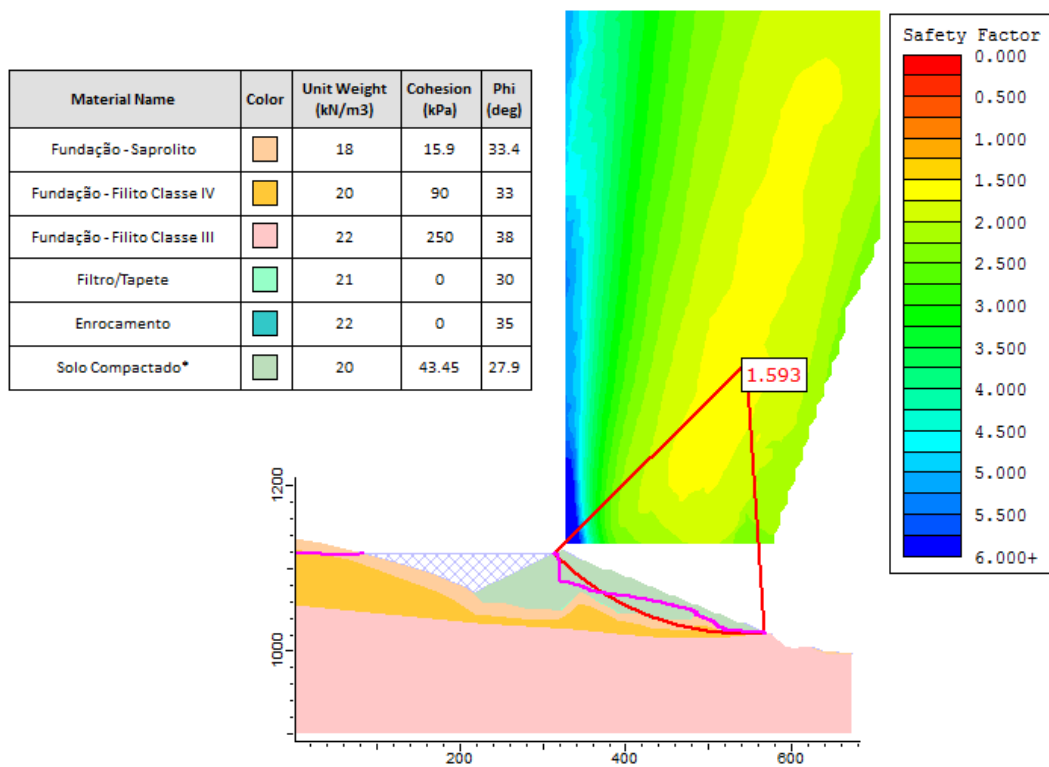


Figura 0.79 - Acréscimo de 10% da coesão no solo compactado – Cenário 2.

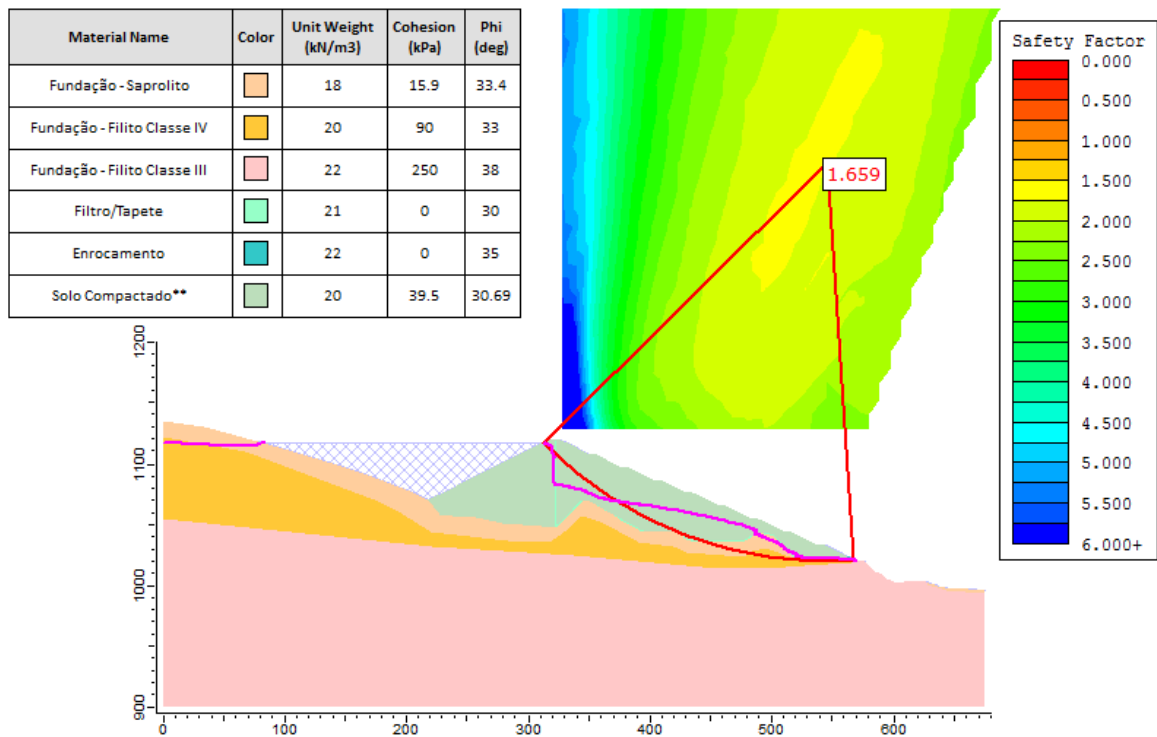


Figura 0.80 - Acréscimo de 10% no ângulo de atrito do solo compactado – Cenário 2.

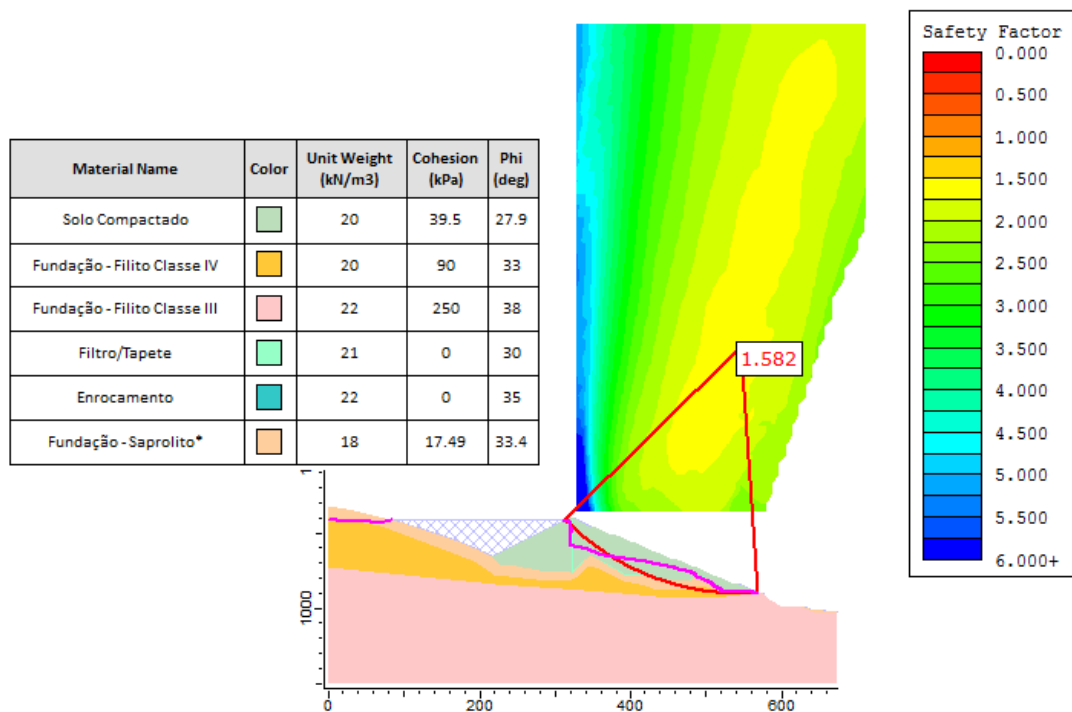


Figura 0.81 - Acréscimo de 10% da coesão do saprolito – Cenário 2.

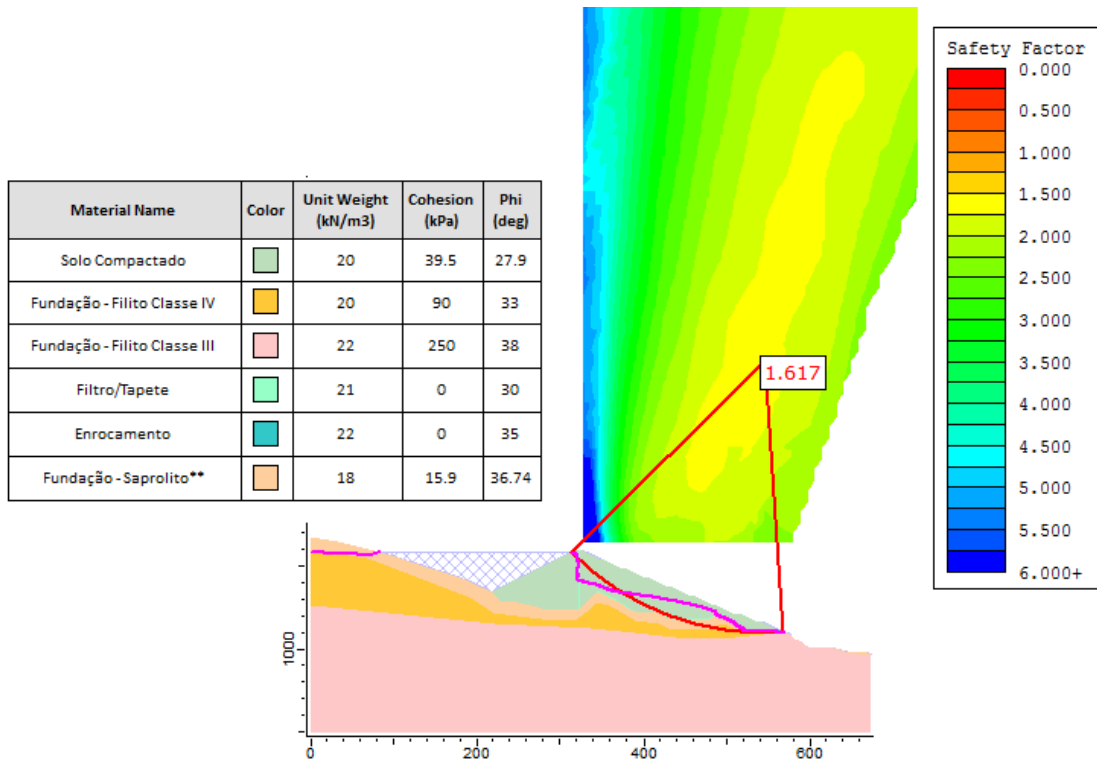


Figura 0.82 - Acréscimo de 10% no ângulo de atrito do saprolito – Cenário 2.

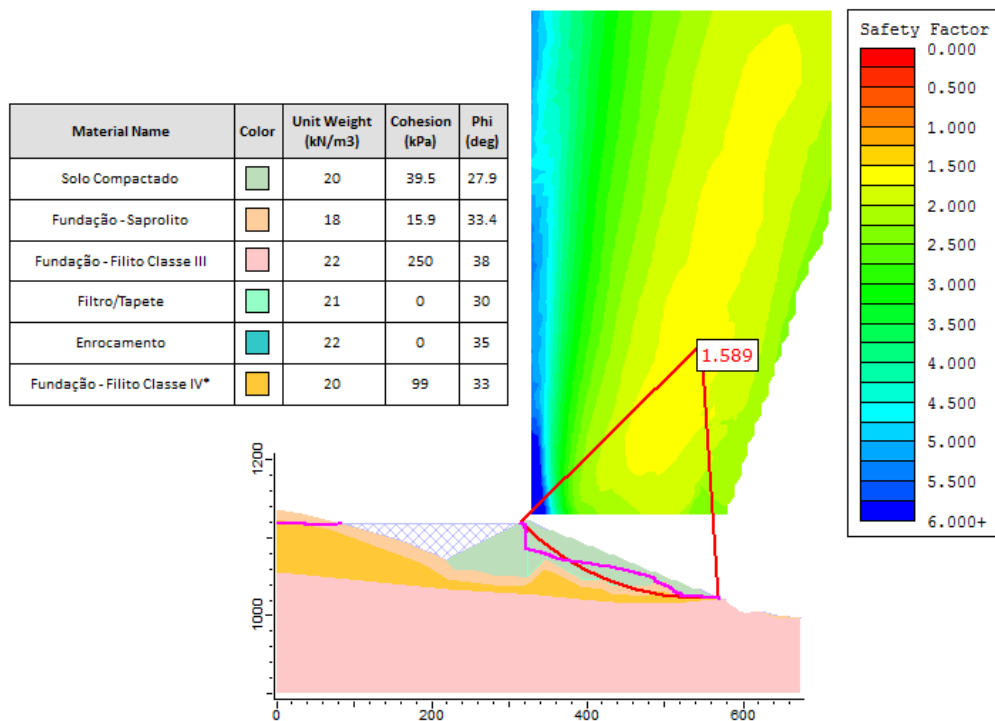


Figura 0.83 - Acréscimo de 10% da coesão do Filito Classe IV – Cenário 2.

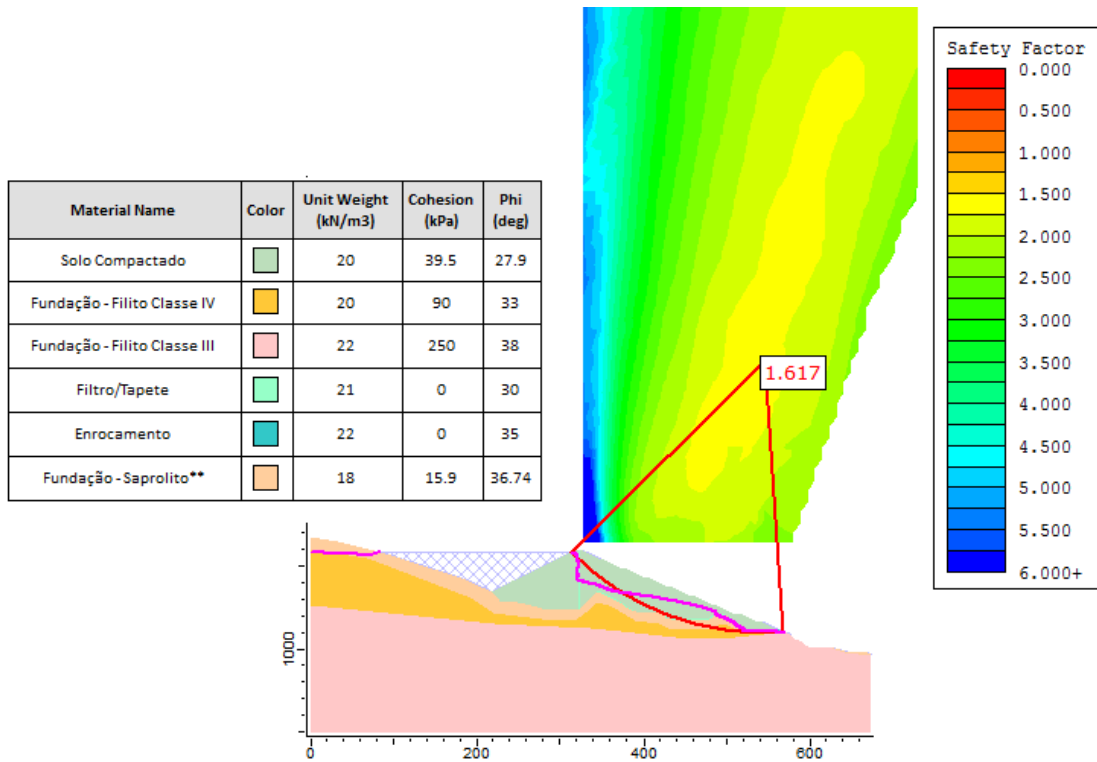


Figura 0.84 - Acréscimo de 10% do ângulo de atrito do Filito Classe IV – Cenário 2.

A Figura 0.85 apresenta a porcentagem de contribuição dos parâmetros na variância.

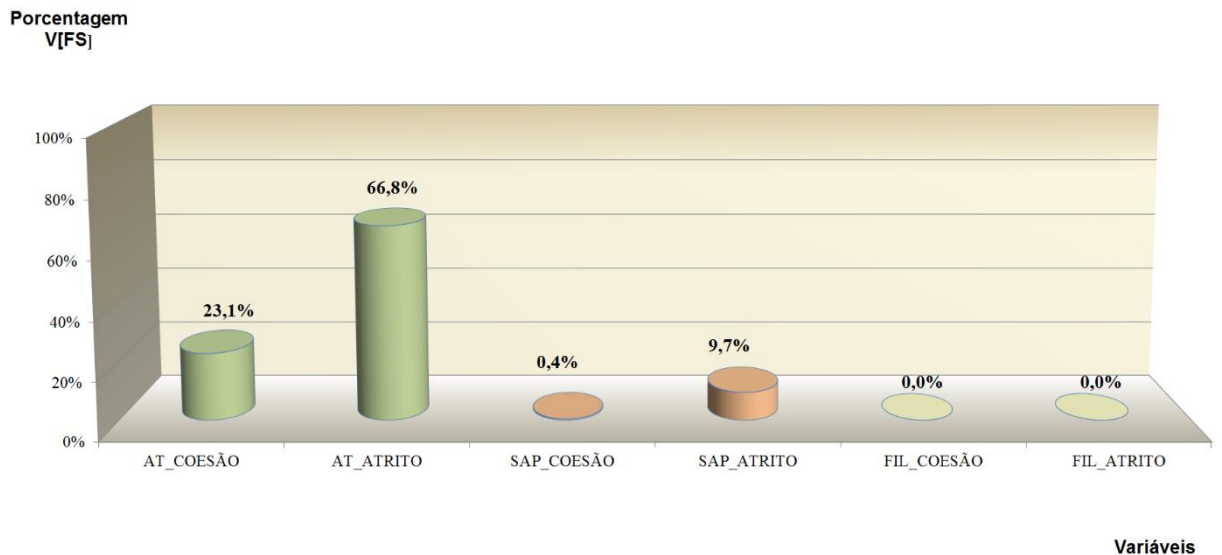


Figura 0.85 - Porcentagem de contribuição dos parâmetros na variância de FS – Cenário 1.

Observa-se que a variável que mais contribuiu na variância do Fator de Segurança para o cenário I foi o ângulo de atrito do aterro, correspondendo a 66,8%, seguido pela coesão do mesmo material, correspondendo a 23,1%. Nesse sentido, a probabilidade de ruptura do cenário

I por instabilização da barragem B pelo método de FOSM é igual a $1,0 \times 10^{-8}$.

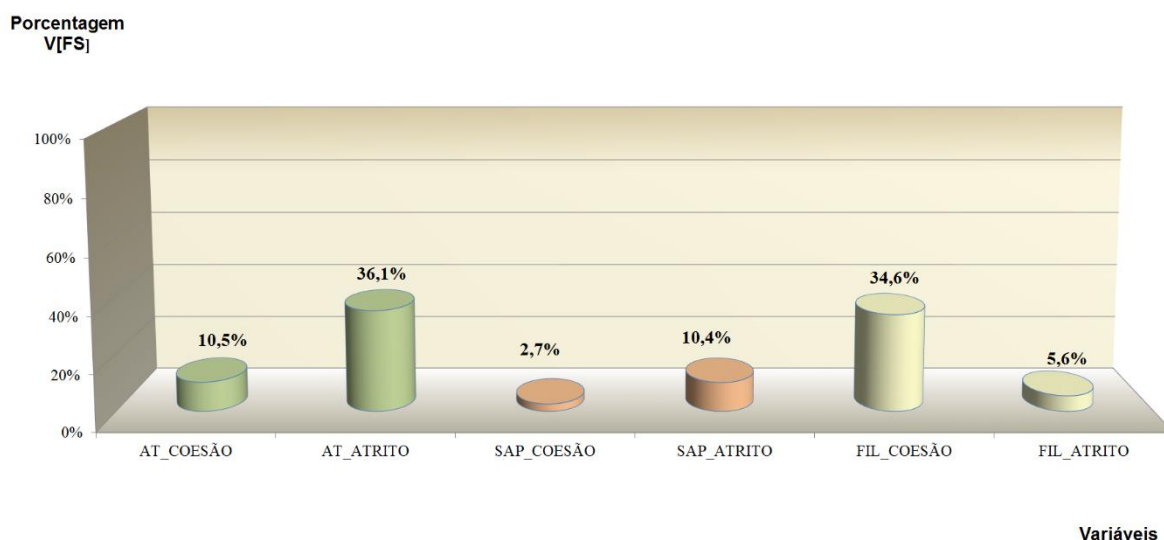


Figura 0.86 - Porcentagem de contribuição dos parâmetros na variância de FS – Cenário II.

Analisando a Figura 0.86 observa-se que a variável que mais contribuiu na variância do Fator de Segurança para o cenário II foi o ângulo de atrito do aterro, correspondendo a 36,1%, seguido da coesão da camada de Filito Classe IV, correspondendo a 34,6%. Nota-se, também, que a elevação na freática na estrutura aumentou a influência do ângulo de atrito da fundação na estabilidade da estrutura. Nesse sentido, a probabilidade de ruptura do cenário II por instabilização da barragem B pelo método de FOSM é igual a $1,0 \times 10^{-8}$.

○ MÉTODO DE MONTE CARLO

Para as simulações aqui apresentadas, o programa Slide® utilizou o gerador de números aleatórios “Parker & Miller v.3” e calculou uma nova superfície de ruptura global para cada nova simulação. Foram realizadas 100.000 simulações, cuja convergência pode ser avaliada pelas Figura 0.35 (cenário 1) e Figura 0.36 (cenário 2), habilitando o procedimento Overall Slope, visando obter maior número de fatores de segurança calculados e determinar uma distribuição com boa aderência às amostras.

Consideraram-se como variáveis aleatórias os parâmetros apresentados na Tabela 0.61, com

seus respectivos valores médios, desvios-padrão e tipo de distribuição de probabilidades. Para os parâmetros com distribuição Normal e Log-Normal, foram considerados como limites inferior e superior os valores referentes à distância de 2 vezes o desvio-padrão ao redor da média (Intervalo de Confiança que compreende 95,5% dos dados).

Os valores médios, desvios-padrão e respectivos limites inferior e superior dos parâmetros considerados para cada material estão apresentados na Tabela 0.61. Buscou-se obedecer à representatividade física para os limites inferior e superior dos parâmetros.

Tabela 0.61 – Média, desvio-padrão e limites inferior e superior considerados.

| COESÃO EFETIVA | | | | | | |
|---------------------------------|-------|----------|------------------------|------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Material | μ | σ | Mínimo Relativo | Máximo Relativo | Valor Absoluto Mínimo | Valor Absoluto Máximo |
| Solo Compactado | 39,5 | 9,8 | 19,5 | 9,5 | 20,0 | 49,0 |
| Fundação - Saprolito | 15,9 | 6,4 | 3,0 | 12,8 | 12,9 | 28,7 |
| Fundação – Filito Classe IV | 90,0 | 54,0 | 60,0 | 108,0 | 30,0 | 198,0 |
| ÂNGULO DE ATRITO EFETIVO | | | | | | |
| Material | μ | σ | Mínimo Relativo | Máximo Relativo | Valor Absoluto Mínimo | Valor Absoluto Máximo |
| Solo Compactado | 27,9 | 2,5 | 5,0 | 5,0 | 22,9 | 32,9 |
| Fundação - Saprolito | 33,4 | 3,3 | 6,6 | 0,6 | 26,8 | 34,0 |
| Fundação – Filito Classe IV | 33,0 | 3,3 | 6,6 | 3,3 | 26,4 | 36,3 |

Os resultados das simulações de Monte Carlo realizadas para o cenário 1 (Condição Normal de Operação) são apresentados na Figura 0.87. Vale ressaltar que o cenário 1 corresponde à condição em que a freática é controlada pelo sistema de drenagem interna da barragem.

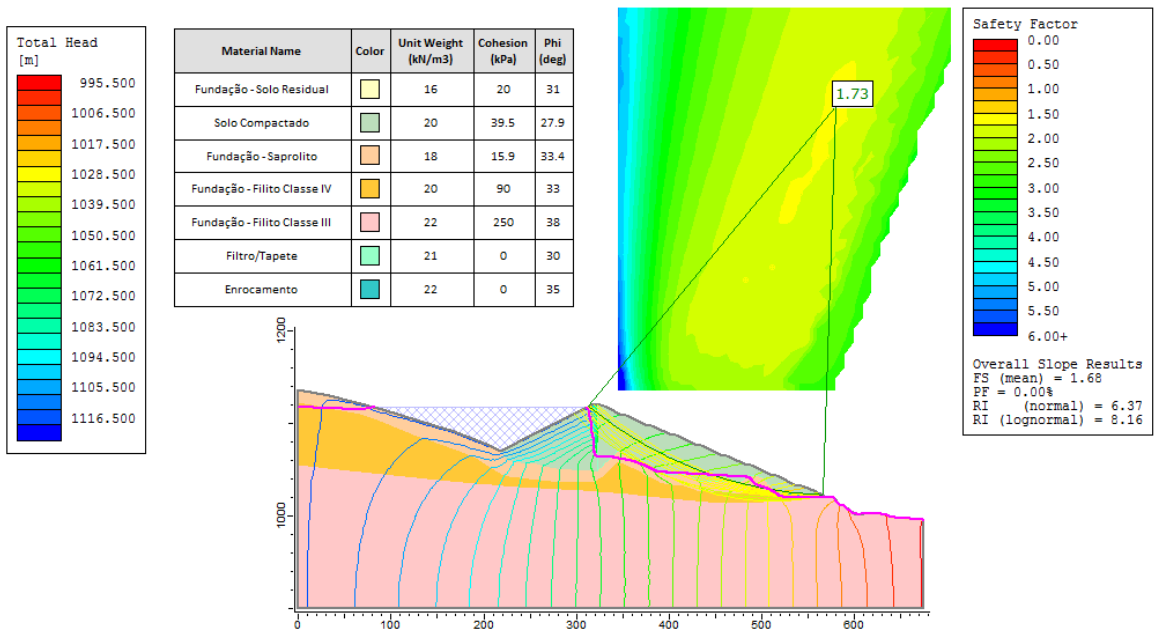


Figura 0.87 - Resultados das simulações de Monte Carlo – Cenário 1.

As análises foram realizadas no Slide 7.0, e os resultados por meio de gráficos estão apresentados na Figura 0.88, Figura 0.89 e Figura 0.90.

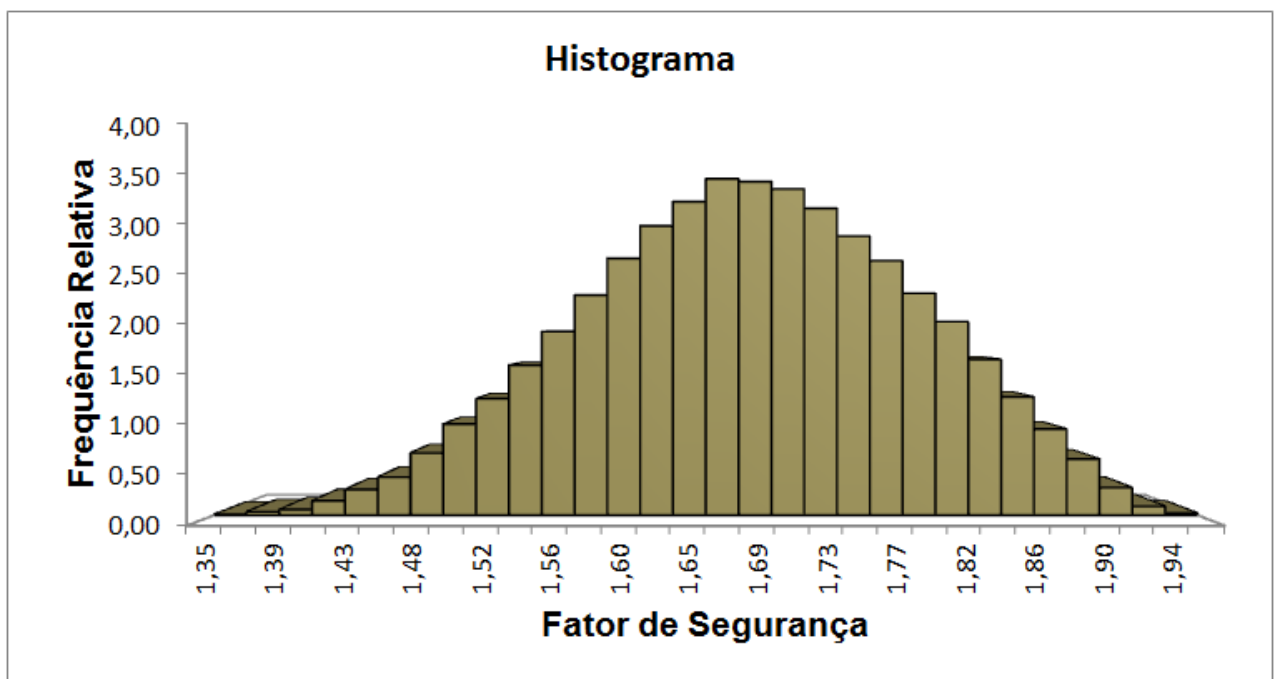


Figura 0.88 – Histograma dos Fatores de Segurança – Cenário 1.

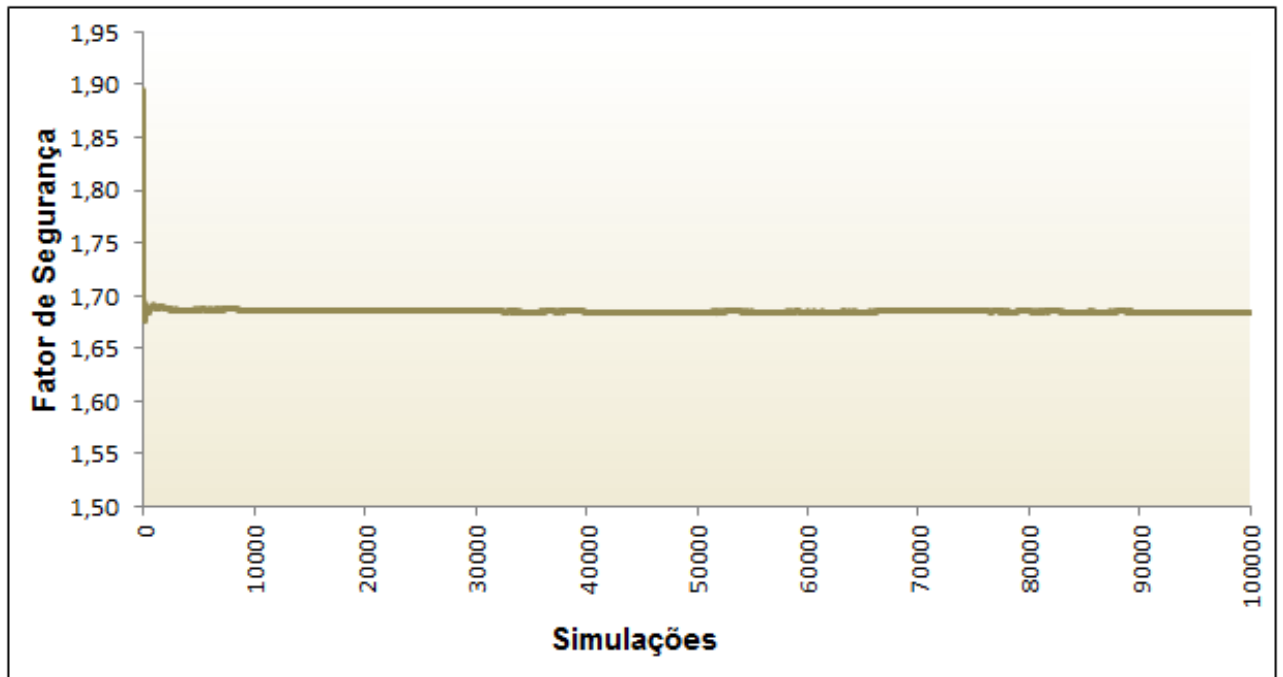


Figura 0.89 – Distribuição dos Fatores de Segurança em relação ao número de análises – Cenário 1.

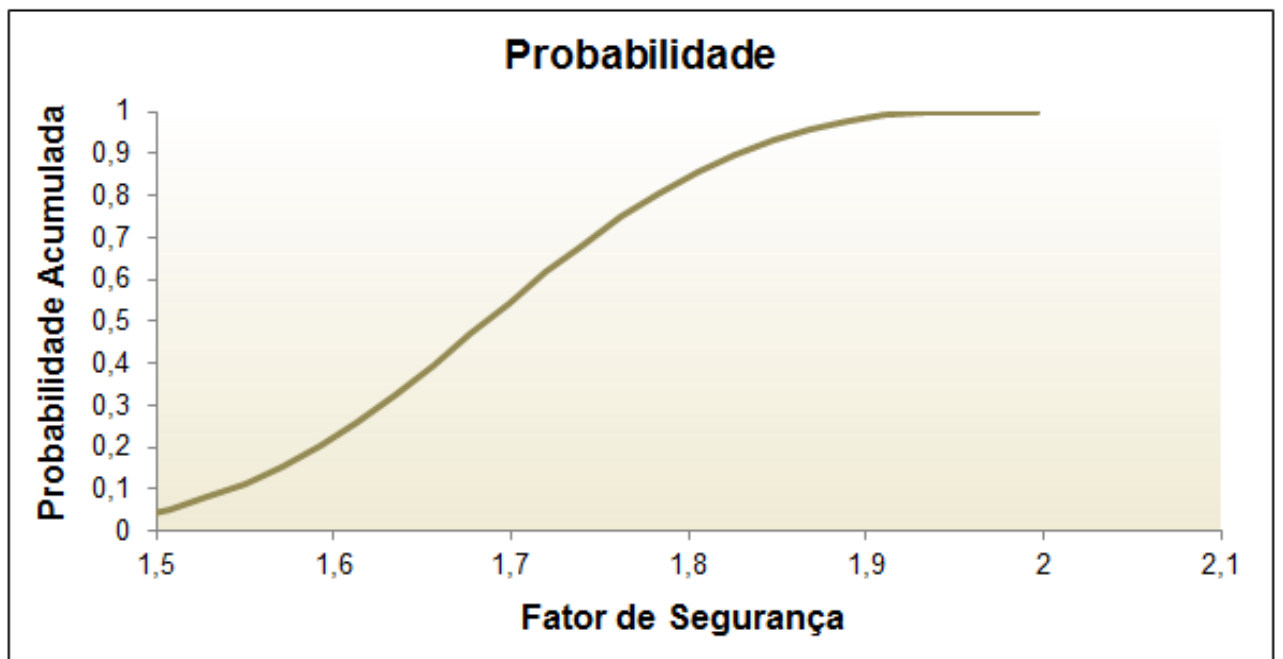


Figura 0.90 – Probabilidade dos Fatores de Segurança – Cenário 1.

Pode-se observar que os fatores de segurança mais frequentes se encontram entre os fatores de 1,65 e 1,73. Nota-se também, que nenhuma simulação resultou em FS < 1, ou seja, a probabilidade de ruptura (número de rupturas dividido pelo número de simulações) obtida é

igual à zero. A análise apresentou um fator de segurança médio de 1,68 e uma probabilidade de falha de 0,00%. Isto é um indicativo de que o valor da probabilidade “real” de ruptura é muito reduzido (menor que 10^{-8}).

Os resultados das simulações de Monte Carlo realizadas para o Cenário 2 (Nível Crítico) são apresentados na Figura 0.91.

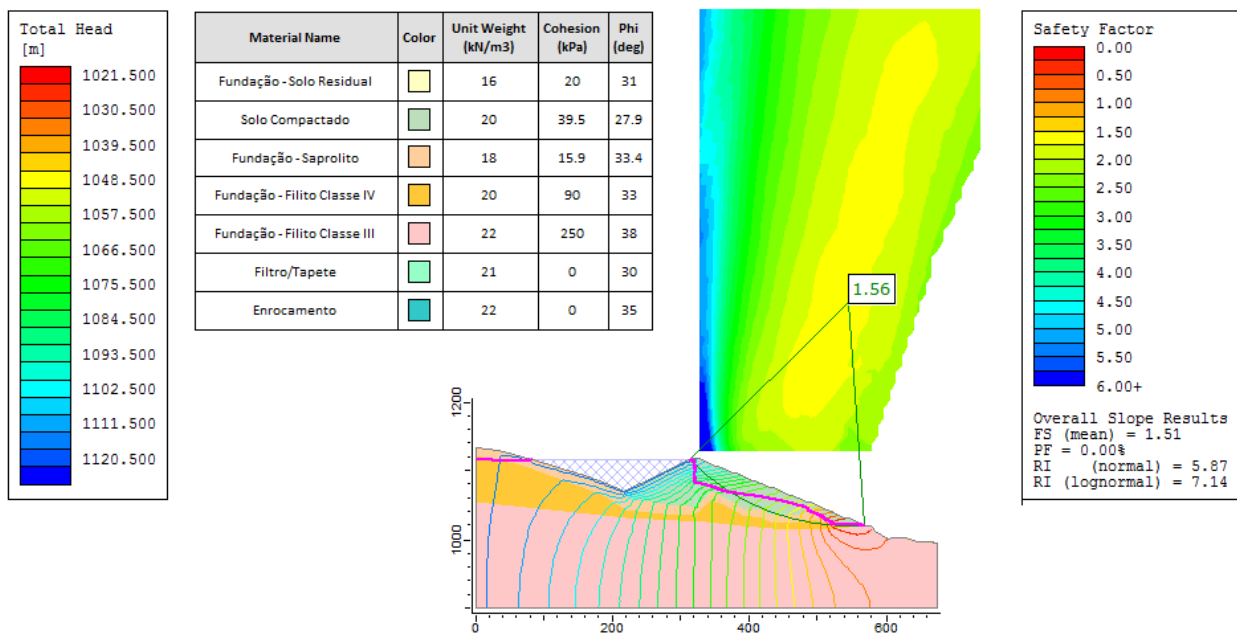


Figura 0.91 - Resultados das simulações de Monte Carlo – Cenário 2.

As análises foram realizadas no Slide 5.0, e os resultados por meio de gráficos estão apresentados nas Figura 0.92, Figura 0.93 e Figura 0.94.

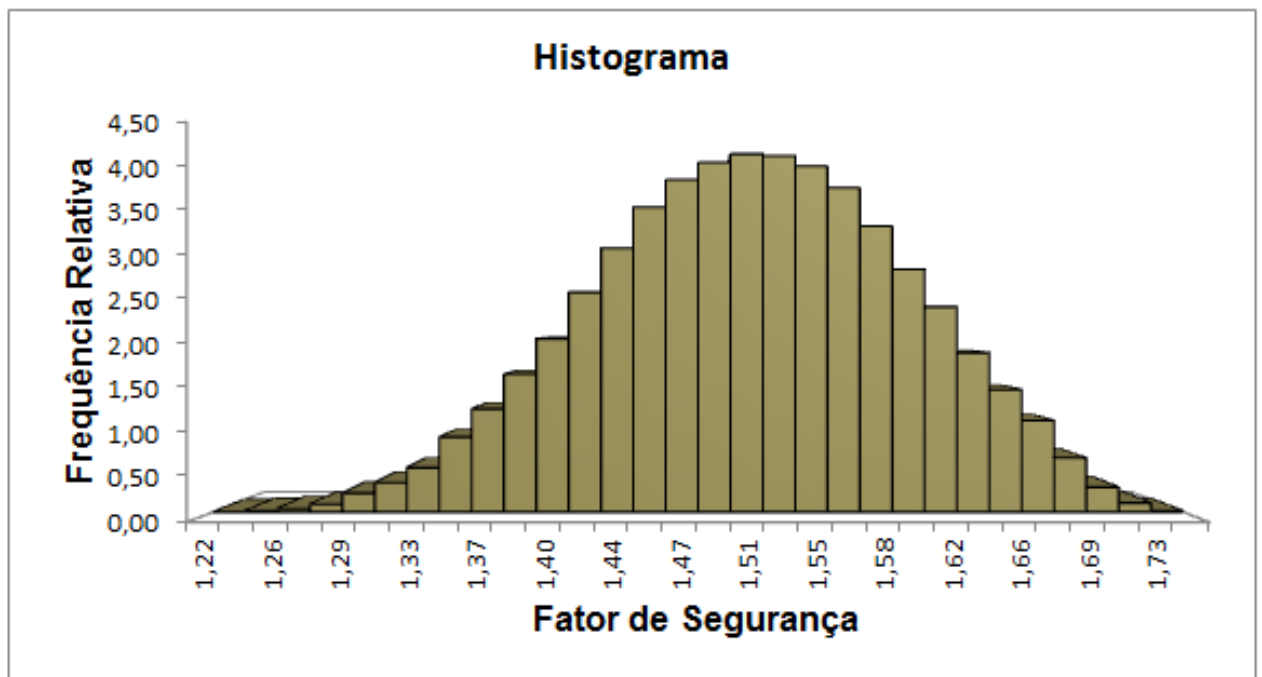


Figura 0.92 – Histograma dos Fatores de Segurança – Cenário 2.

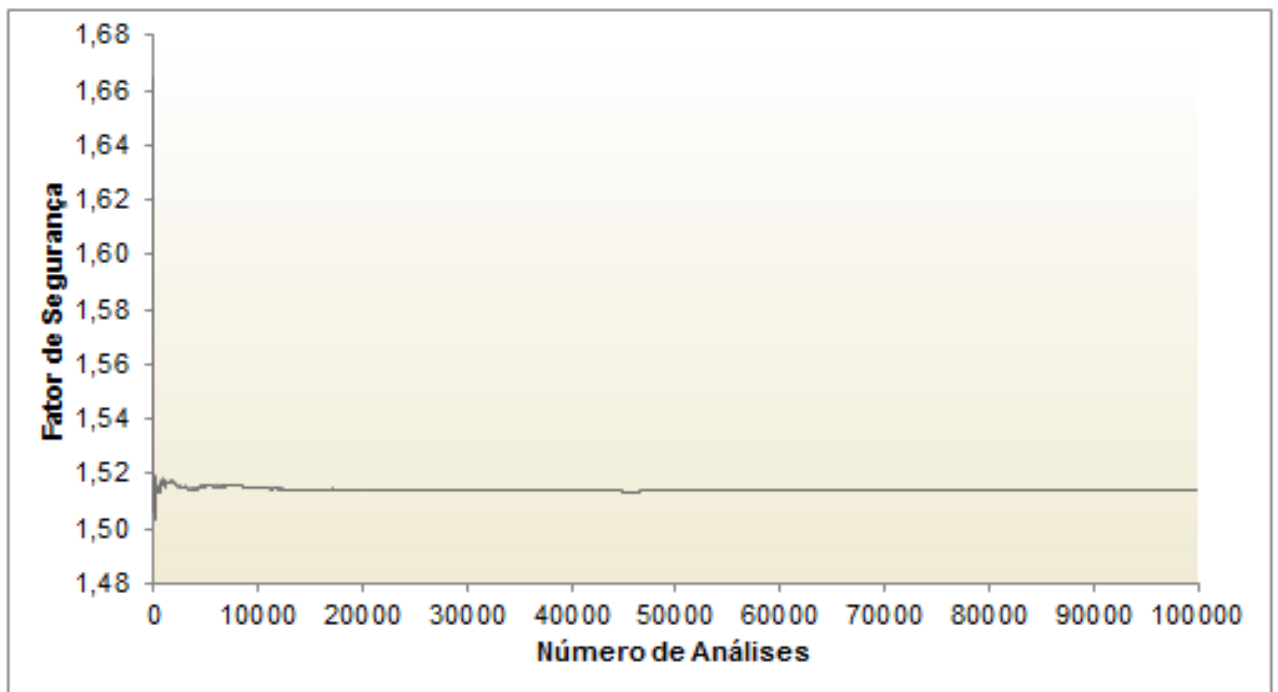


Figura 0.93 – Distribuição dos Fatores de Segurança em relação ao número de análises – Cenário 2.

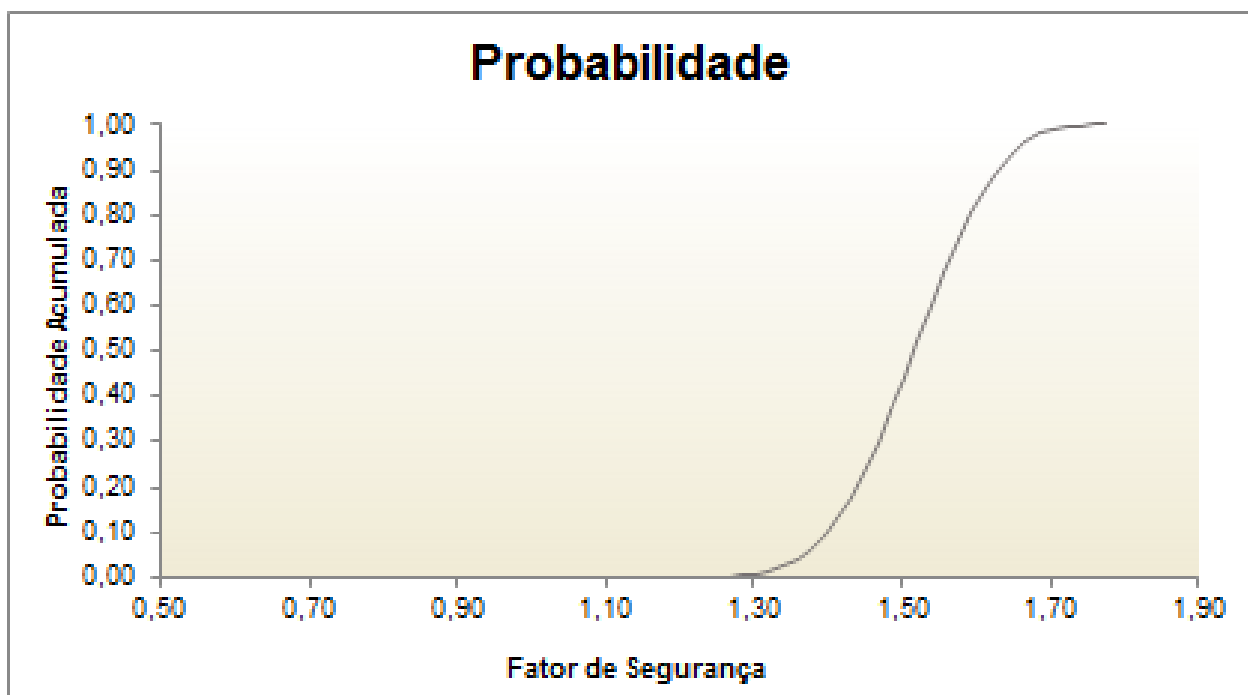


Figura 0.94 – Probabilidade dos Fatores de Segurança – Cenário 2.

Assim como no Cenário 1, nota-se que no Cenário 2 nenhuma simulação resultou em $FS < 1$, ou seja, a probabilidade de ruptura (número de rupturas dividido pelo número de simulações) obtida é igual a zero. Isto é um indicativo de que o valor da probabilidade “real” de ruptura é muito reduzido (menor que 10^{-8}). O valor de Fator de Segurança médio encontrado foi de 1,51 e a probabilidade de ruptura foi de 0,00%.

A Tabela 0.62 a seguir sintetiza as probabilidades de todos os cenários considerados para ocorrência de ruptura por instabilização.

Tabela 0.62 - Probabilidades de ocorrência de ruptura por instabilização.

| Cenário | Método de Ruptura | Probabilidade de Ruptura |
|---------|-------------------|--------------------------|
| 1 | Fosm | $1,0 \times 10^{-8}$ |
| | Monte Carlo | $1,0 \times 10^{-8}$ |
| 2 | Fosm | $1,0 \times 10^{-8}$ |
| | Monte Carlo | $1,0 \times 10^{-8}$ |

Para o cenário 1, a probabilidade de ruptura por instabilização da barragem B é igual a $1,0 \times 10^{-8}$

8.

Para o cenário 2, a probabilidade de ruptura por instabilização da barragem B é igual a $1,0 \times 10^{-8}$.

8.

- MODO DE FALHA EROSÃO INTERNA

Neste capítulo são apresentadas as estimativas de probabilidade de ruptura da Barragem A associada à erosão interna.

A metodologia definida para a análise probabilística da ruptura da Barragem A associada à erosão interna foi a combinação de Árvore de Eventos (ETA) e Árvore de Falhas (FTA).

- EROSÃO INTERNA PELO MACIÇO

A Figura 0.95 apresenta a árvore de eventos elaborada para o cálculo da probabilidade de ruptura da estrutura por erosão interna pelo maciço, já que o maciço foi construído com materiais de diferentes características granulométricas. A probabilidade de ruptura calculada foi de 2×10^{-6} .

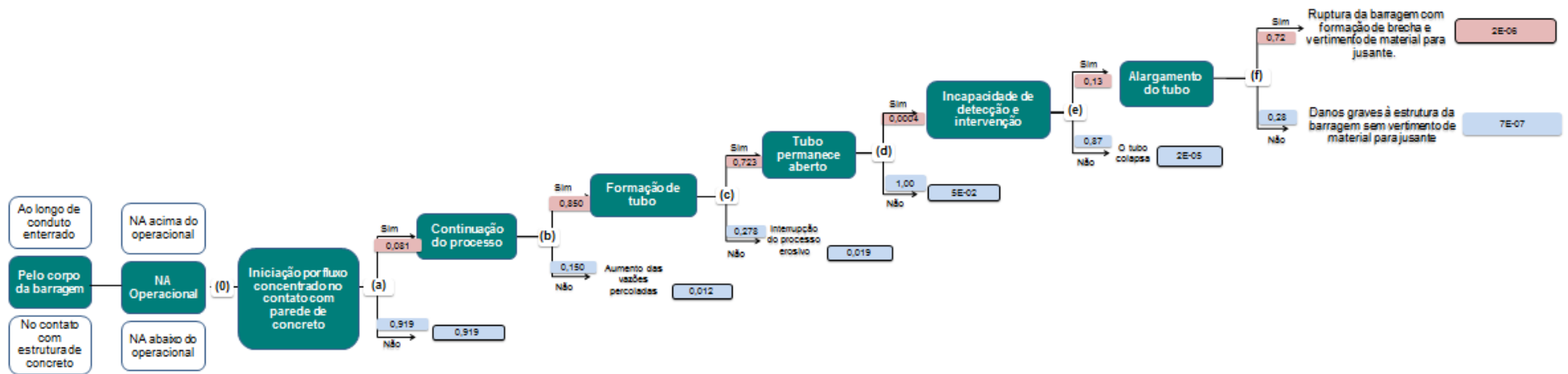


Figura 0.95 – Árvore de eventos – Erosão Interna pelo maciço.

- Nó (0) – Nível do reservatório

Neste nó, analisa-se para qual nível do reservatório o processo de erosão interna é possível.

Considera-se que a erosão regressiva pelo maciço pode ter início com o reservatório no nível d'água operacional (N.A. na El.1.117,50 m). Desta forma, para este nó foi atribuída a probabilidade $P = 1$.

- Nó (a) – Início do processo erosivo

O evento iniciador do processo de erosão interna analisado corresponde à erosão por fluxo concentrado no contato com paredes de concreto, conforme ilustrado na Figura 0.96.

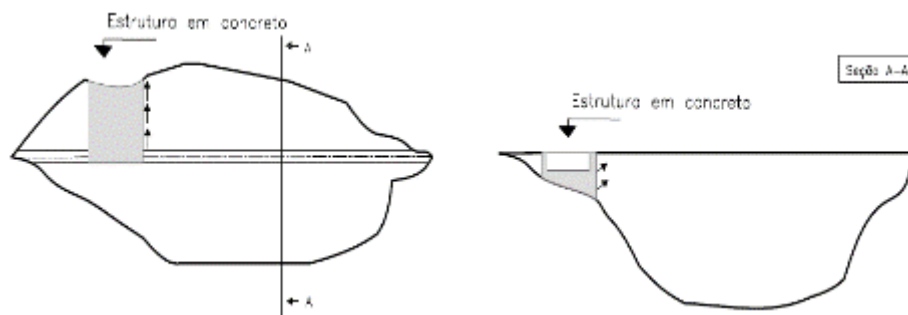


Figura 0.96 - Modelo de ruptura por erosão interna por fluxo concentrado no contato com paredes de concreto.

Nesta árvore de falha são consideradas as características construtivas do contato da parede com o maciço. A probabilidade de ocorrência deste nó da árvore de eventos foi estimada a partir da árvore de falhas 1 apresentada na Figura 0.97 e das considerações apresentadas nas Tabela 0.63 e Tabela 0.64.

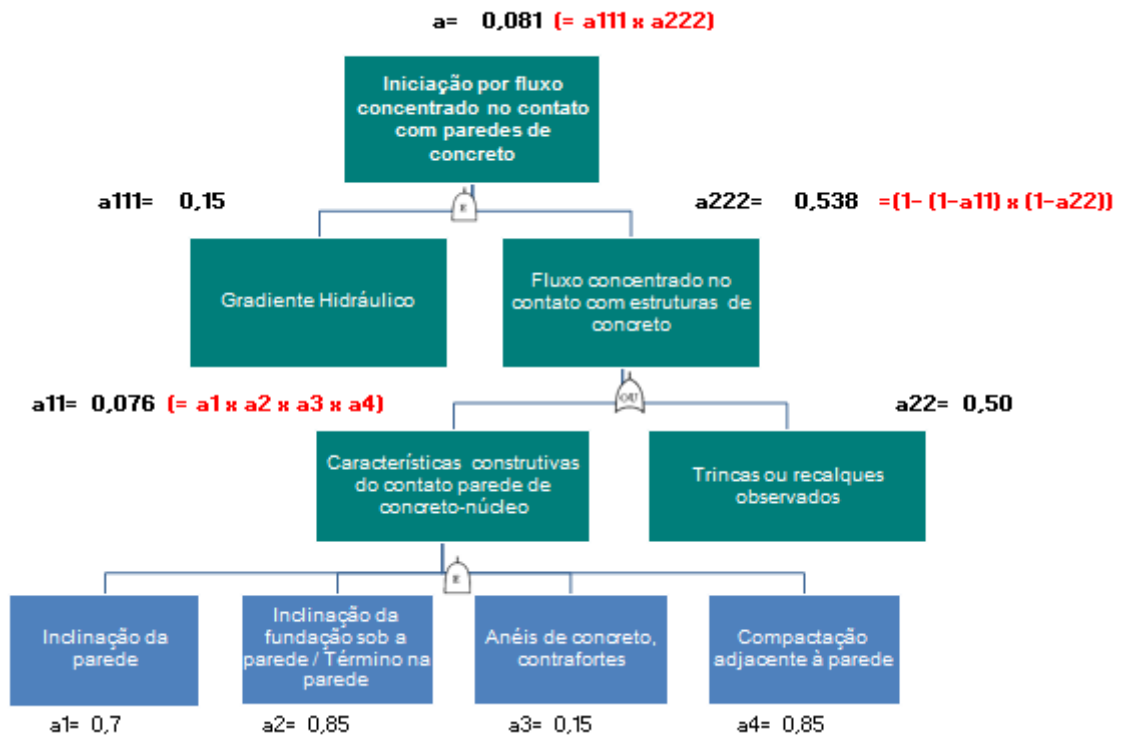


Figura 0.97 - Árvore de falhas 1 para o nó (a) da árvore de eventos .

Tabela 0.63 - Fatores de Influência na Probabilidade de Iniciação de Erosão Interna-Gradiente Hidráulico.

| Fator de influência | Virtualmente certo | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|----------------------|-------------------------------|---------------|--------|----------------|---|
| Gradiente Hidráulico | Presença de surgência de água | Alto | Médio | Baixo | Baixo gradiente hidráulico no contato com a parede de concreto. |

Tabela 0.64 - Fatores de Influência na Probabilidade de Sufusão em Solos sem Coesão (Foster and Fell, 2000 apud Fell, 2005).

| Fator de influência | Mais provável | Bastante provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|-------------------------------------|---|--|---|---|---|
| Inclinação da parede | Inclinada na direção do núcleo ou vertical com inclinação mais suave na parte inferior | Vertical | Inclinação 0,1H - 1V a 0,5H a 1V | Inclinação mais suave que 0,5H a 1V | O vertedouro é retangular. |
| Inclinação da fundação sob a parede | Inclinação acentuada a partir do muro | Inclinação inferior a 30° a partir do muro | Horizontal | Inclinação na direção do muro | |
| Término na parede | Degraus verticais e horizontais | Áspero e irregular | Liso e planar | Plano liso além de talude plano | |
| Anéis de concreto, contrafortes | Vários, próximos uns dos outros. | Um único | - | Nenhum | Não há anéis de concreto. |
| Compactação adjacente à parede | Sem compactação especial adjacente ao muro | - | - | Compactação cuidadosa adjacente ao muro | Durante a obra no período chuvoso, houve carregamento de material abaixo do extravasor já construído. após esse período houve uma reconstrução, porém não é possível garantir um controle de compactação na área. |
| Trincas ou recalques observados | Poços mostram trinca aberta no contato, estendendo abaixo do NA considerado na análise (P=1,0 neste caso) | Trinca na superfície entre a parede e o aterro e/ou grande recalque localizado na crista do maciço próx. ao muro | Nenhuma trinca ou recalque localizado significativo | Nenhuma trinca observada em poços de inspeção abertos no contato muro-núcleo (baixa probabilidade neste caso) | |

Nota 1: Caso <93% do grau de compactação normal, ramo seco da umidade, muito mais provável.

Nota 2: d15c = diâmetro da partícula da fração grossa da curva granulométrica para a qual 15% das partículas teriam diâmetro inferior; d15f = diâmetro da partícula da fração fina da curva granulométrica para a qual 15% das partículas teriam diâmetro inferior.

- Nó (b) – Continuação do processo erosivo

O nó (b) avalia se no ponto de saída da percolação existe algum tipo de sistema ou filtro capaz de impedir a evolução do processo de erosão.

A Tabela 0.65 apresenta os fatores de influência na probabilidade de continuação do processo erosivo.

Tabela 0.65 - Fatores de Influência na Probabilidade de Continuação do Processo Erosivo – Existência de Filtro no Ponto de Saída da Percolação.

| Fator de influência | Virtualmente certo | Mais Provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|--|---|--------------------------|------------------|----------------------|--|
| Existência de filtro no ponto de saída da percolação | Ausente ou saída livre ⁽¹⁾ . | Presente mas Inadequado. | Sem informações. | Presente e Adequado. | Não há filtro no ponto de saída da percolação. |

Nota: Segundo USBR (2012), quando há uma saída aberta ou livre para o fluxo d'água, a probabilidade de continuação da erosão é virtualmente certa.

- Nó (c) – Formação do tubo

Este nó da árvore de eventos avalia a habilidade do material do maciço de suportar o teto do tubo, permitindo a ocorrência do entubamento (*piping*).

A avaliação deste nó é feita a partir da Árvore de Falhas 2 apresentada Figura 0.98 e Tabela 0.66.

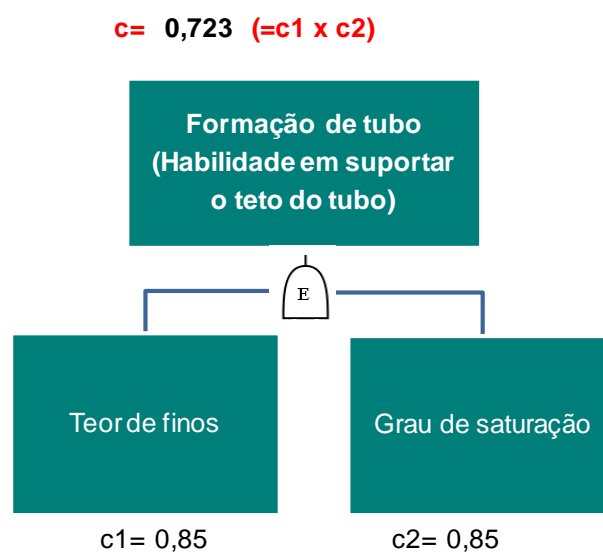


Figura 0.98 - Árvore de falhas 2 para o nó (c) da árvore de eventos.

Tabela 0.66 - Fatores de Influência na Probabilidade de Formação do Tubo - Habilidade em Suportar o Teto (modificado Foster & Fell, 2000 *apud* Fell *et. al*, 2005).

| Fator de influência | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|-------------------------------------|---|----------------------------|---------------------------------|---|
| Teor de finos (% menor que 0,075mm) | Teor de finos > 15% | Teor de finos < 15% e > 5% | Sem finos ou teor de finos < 5% | Segundo os ensaios de granulometria, o teor de finos é superior a 15%. |
| Grau de saturação | Parcialmente saturado (primeiro enchimento) | - | Saturado | O reservatório vai enchendo à medida que o rejeito é disposto e não opera com o NA soleira do extravasor. |

- Nó (d) – Progressão: o tubo permanece aberto

A avaliação de permanência da abertura do tubo e feita no nó (d) através da Árvore De Falhas 3 apresentada na Figura 0.99 e das considerações apresentadas na Tabela 0.67 e Tabela 0.68.

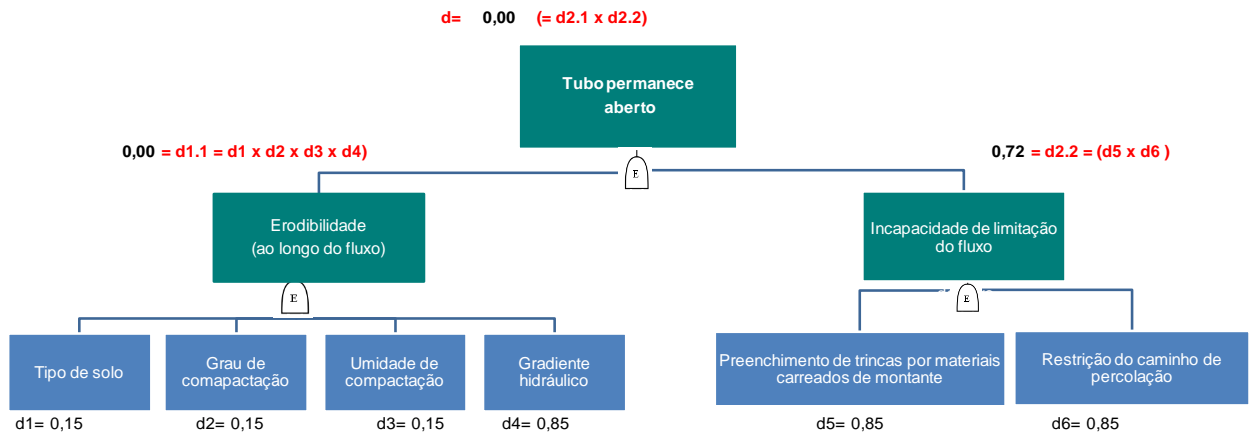


Figura 0.99 - Árvore de falhas 3 para o nó (d) da árvore de eventos

Tabela 0.67 - Fatores de Influência na Probabilidade de Progressão do Tubo - Erodibilidade (ao Longo do Fluxo) (modificado Foster & Fell, 2000 *apud* Fell *et. al*, 2005).

| Fator de influência | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|-------------------------------------|---|--|--|---|
| Tipo de solo ⁽¹⁾ | Muito uniforme, areia fina sem coesão (IP < 6) Solo bem graduado sem coesão (IP < 6) | Solo bem graduado com coesão (6 < IP < 15) | Argila plástica (IP > 15) | O solo é classificado como silte arenoso. Os valores de IP encontrado nas amostras ensaiadas encontram-se maiores que 15. |
| Grau de Compactação | Mal compactado, GC < 95% do grau de compactação normal | 95-98% do grau de compactação normal | Bem compactado, GC ≥ 98% do grau de compactação normal | O grau de compactação médio foi de 98,65%. |
| Umidade de Compactação | Mais seco do que a umidade ótima de compactação (cerca de -3% ou menor) | Compactação entre -1% e -2% da umidade ótima | O | O desvio de umidade de compactação foi de -0,22%. |
| Gradiente Hidráulico ⁽²⁾ | Alto | Médio | Baixo | Baixo gradiente hidráulico no contato com a parede de concreto. |

Nota 1: Avaliações do material do aterro ao longo do fluxo.

Nota 2: Mesmo barragens com gradientes baixos, como 0,05 por exemplo, podem experimentar ruptura por erosão interna.

Nota 3: Caso exista a possibilidade do solo ser dispersivo, este fator de influência também poderá ser incluído nas análises, conforme Fell *et. al*, 2005.

Tabela 0.68 - Fatores de Influência na Probabilidade de Progressão do Tubo - Limitação do Fluxo (modificado Foster & Fell, 2000 *apud* Fell *et. al*, 2005).

| Fator de influência | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|--|---|--|--|--|
| Preenchimento de trinças por materiais carreados de montante | Barragem Homogênea. Zona de montante com material coesivo | - | Zona a montante do núcleo com capacidade para o preenchimento de trinças (solo não coesivo) | A coesão média das amostras é de 39,5 kPa, apresentando-se bastante coesivo. A permeabilidade do aterro encontra-se na ordem de 10 ⁻⁶ cm/s. |
| Restrição do fluxo pelo zoneamento de montante | Barragem homogênea. Zona de alta permeabilidade a montante do núcleo | Zona a montante do núcleo com permeabilidade média a alta. | Em barragens zonadas, zona granular a montante do núcleo com permeabilidade média a baixa / Barragem com núcleo de concreto ou de enrocamento com face de concreto | |

○ NÓ (E) – INCAPACIDADE DE DETECÇÃO E INTERVENÇÃO

Este nó da árvore de eventos avalia a incapacidade de detecção e intervenção do processo

erosivo através da árvore de falhas 4 apresentada na Figura 0.100 e considerações apresentadas nas Tabela 0.69 e Tabela 0.70.

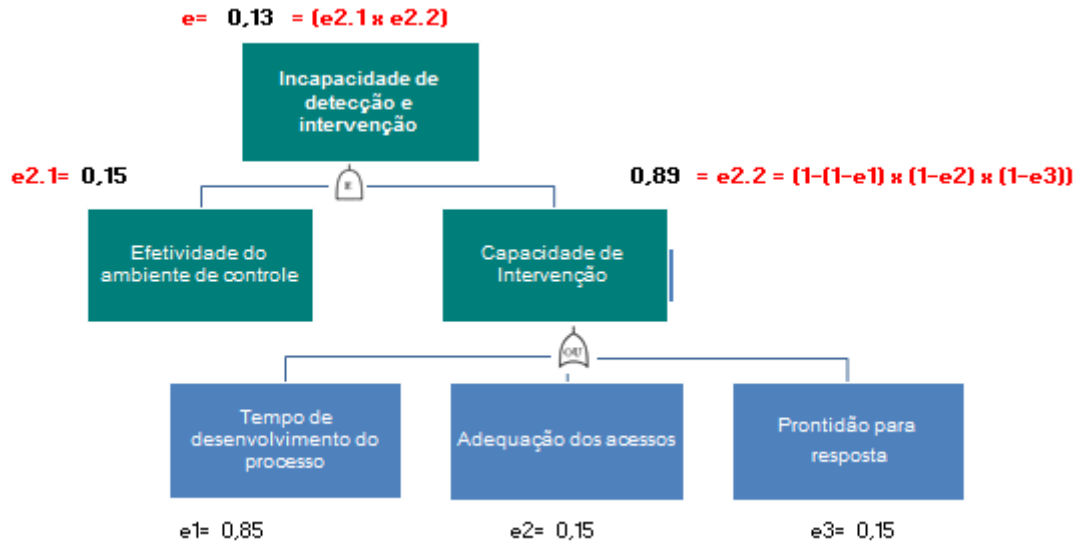


Figura 0.100 - Árvore de falhas 4 para o nó (e) da árvore de eventos

Tabela 0.69 - Fatores de Influência na Probabilidade de Incapacidade de Detecção e Intervenção - Efetividade do Ambiente de Controle.

| Fator de influência | Mais provável | Bastante provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|--|--|---|--|---|--|
| Efetividade do ambiente de controle ⁽¹⁾ | Ambiente de controle informal ⁽²⁾ | Ambiente de controle padronizado ⁽³⁾ | Ambiente de controle monitorado ⁽⁴⁾ | Ambiente de controle otimizado ⁽⁵⁾ | Existem leituras e inspeções visuais regulares, bem como procedimentos de inspeção e monitoramento, a gestão de segurança é feita por equipe especializada, os dados são armazenados e interpretados periodicamente com planos de reposta. A barragem possui Auditoria externa. |

Nota1: A efetividade do ambiente de controle é um indicativo da probabilidade de não identificar um risco geotécnico em tempo hábil para sua neutralização antes da ocorrência da ruptura da barragem.

Nota 2: Ambiente de controle informal: Realização de inspeções visuais e leituras da instrumentação sem padronização, com controle parcial das ocorrências identificadas e de planos de ação. Ausência de treinamento formal ou comunicação dos controles.

Nota 3: Ambiente de controle padronizado: Realização de inspeções visuais e leituras da instrumentação padronizadas e com a periodicidade adequada; com controle das ocorrências identificadas e de planos de ação de forma estruturada. A instrumentação instalada pode ser parcialmente adequada para o monitoramento dos modos de falha e os tipos de controle existentes parcialmente adequados ou insuficientes.

Nota 4: Ambiente de controle monitorado: Controles existentes adequados e suficientes e suportados por sistema informatizado bem estruturado. Existência de treinamento formal e comunicação dos controles. Os dados da instrumentação são analisados periodicamente e o banco de dados da instrumentação possui alertas automáticos.

Nota 5: Ambiente de controle otimizado: Controles existentes adequados e suficientes e suportados por sistema informatizado que integra as informações de inspeções e auditorias internas e externas e sistema padronizado de análise de riscos, permitindo tomadas de decisão rápidas e eficientes. Equipe treinada e responsabilidades bem definidas.

Tabela 0.70 - Fatores de Influência na Probabilidade de Incapacidade de Detecção e Intervenção – Capacidade de Intervenção.

| Fator de influência | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|--|--|---|---|--|
| Tempo de formação da brecha ⁽¹⁾ | Rápido (horas) | Médio (dias a semanas). | Lento (semanas ou meses) | Foi considerado um tempo mínimo para a formação de brecha de 15 (Estudo DAM Break) |
| Adequação dos acessos ⁽²⁾ | Acesso precário, em especial nos períodos chuvosos | Obra em local de difícil acesso. | Obra em local de fácil acesso | Acesso em bom estado de conservação |
| Prontidão para resposta ⁽³⁾ | Inexistência de PAE, equipes sem treinamento | Existência de PAE, equipes sem treinamento. | Disponibilidade e preparo da equipe de resposta | Existe uma equipe responsável pela operação da estrutura. |

Nota 1: Tempo de evolução do processo ou tempo de formação da brecha: processos que evoluem rapidamente reduzem o tempo disponível para intervenções corretivas. A métrica utilizada foi adaptada de USBR, 2012 apud Fell et al., 2003.

Nota 2: A existência de acessos adequados reduz o tempo de execução de obras emergenciais.

Nota 3: A disponibilidade do Plano de Ação Emergencial (PAE) e de equipes treinadas reduz o tempo de resposta.

- NÓ (F) – FORMAÇÃO DO MECANISMO DE FALHA – ALARGAMENTO DO TUBO

Este nó da árvore de eventos avalia a formação do mecanismo de falha adotado alargamento de tubo. O mecanismo foi considerado por ser o mais comum de acordo com as estatísticas de ruptura de barragens. A Figura 0.101 apresenta a árvore de eventos e Tabela 0.71 apresenta os fatores de influência na probabilidade de formação de brecha - Alargamento do Tubo (modificado Foster & Fell, 2000 apud Fell et. al, 2005).

Árvores de Falhas 5

Formação do mecanismo de falha

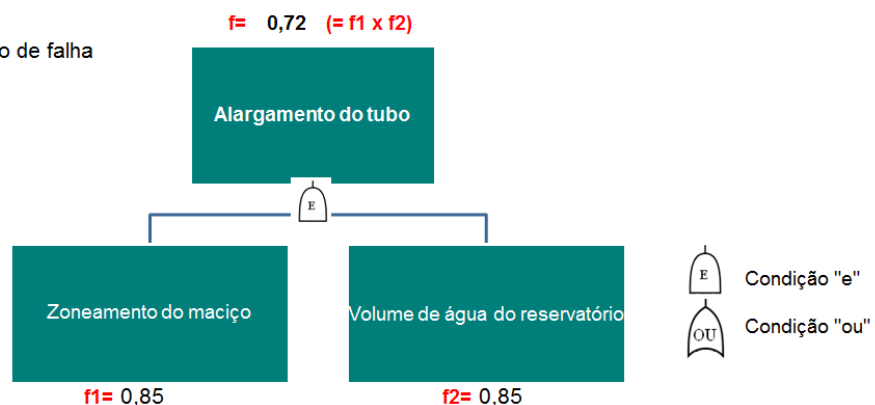


Figura 0.101 - Árvore de falhas 5 para o nó (f) da árvore de eventos.

Tabela 0.71 - Fatores de Influência na Probabilidade de Formação de Brecha - Alargamento do Tubo (modificado Foster & Fell, 2000 apud Fell et. al, 2005).

| Fator de influência | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|---------------------------|--|---|--|---|
| Zoneamento do maciço | Seção Homogênea. Barragem zonada com zona de jusante capaz de suportar o teto do tubo | Barragem zonada, talude de jusante de areia ou pedregulho com finos | Barragem zonada com talude de jusante de pedregulho ou enrocamento | A Barragem apresenta seção homogênea. Material silte arenoso é encontrado no maciço. |
| Volume de água armazenado | Elevado | - | Pequeno | O reservatório encontra-se vazio, porém, o volume de projeto é de 2.500.00,00 m³. Sendo assim, esse volume de água disponível seria suficiente para alimentar o tubo e formar a brecha. |

CONSEQUENCIAS

A Tabela 0.72 apresenta a população atingida, conforme critério estabelecido no item 3.1 deste estudo.

Tabela 0.72 – População Atingida, Potencial de Perdas de Vidas e Danos Diretos da Barragem B.

| População Atingida * | Edificações Atingidas | Perda Potencial de Vidas * |
|----------------------|-----------------------|----------------------------|
| 680 | 529 | 0 |

Observa-se que o tempo de chegada da onda até a população é grande, e, portanto, não há perda de vida, já que toda a população será evacuada a tempo.

CÁLCULO DO RISCO

A maior probabilidade de ocorrência de falha para a barragem B foi a Erosão Interna, calculada em 2×10^{-6} . A consequência, considerando as perdas de vidas, obtida na mancha de inundação, foi mensurada em 0 vidas perdidas dentro da Zona de Autossalvamento. O produto destas duas informações plotado no gráfico da Figura 0.102, indicou que existe um risco aceitável.

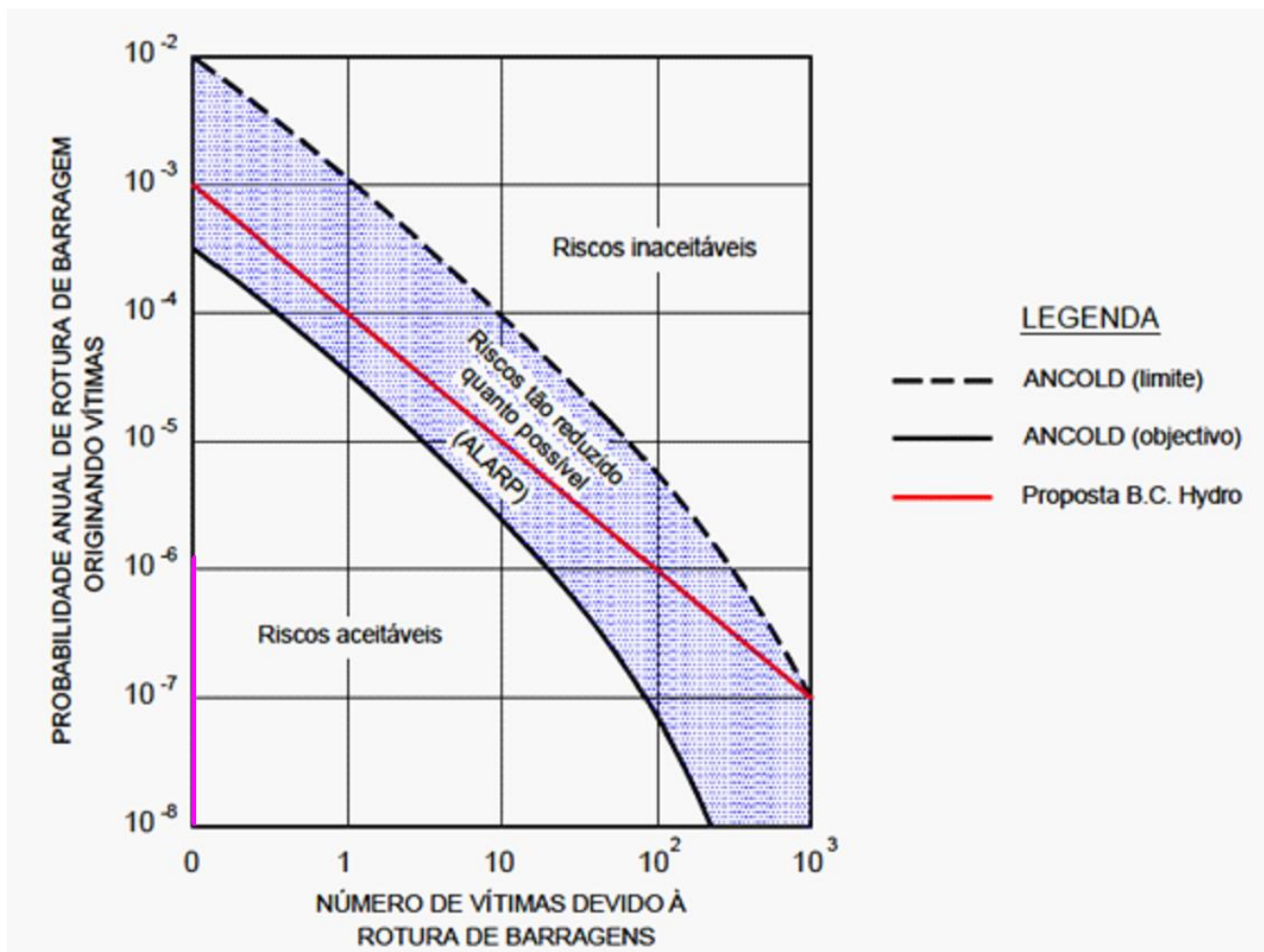


Figura 0.102 - Risco Aceitável da Barragem B.

AÇÕES PARA REDUZIR OS RISCOS DE FALHAS

De acordo com a Tabela 0.12, quando a barragem for classificada como “Risco a aceitável”, deverão continuar com os monitoramentos e estudos periódicos, conforme preconizados nas legislações vigentes.

BARRAGEM C

DESCRIÇÃO DA BARRAGEM

A Barragem C tem como principal finalidade a decantação da água e retenção de sedimentos gerados pelas atividades de lavra do Minério de Ferro.

O resumo das características referentes à ficha técnica da estrutura é apresentado na Tabela 0.73.

Tabela 0.73 - Ficha Técnica da Barragem C.

| Dados gerais | Características |
|---|---|
| Finalidade | Contenção de Sedimentos |
| Classificação da ANM | B |
| Classificação do Sedimento | Classe II B – Inertes |
| Situação da Estrutura | Em Operação |
| Cota Atual da Crista (m) | 742,0 |
| Altura Atual da Barragem (m)* | 16,0 |
| Largura da Crista (m) | 5,3m |
| Comprimento da Crista (m) | 210,0 |
| Volume Atual do Reservatório (m ³) ** | 1,089,830.50 |
| Tipo de Seção | Seção mista de solo. |
| Drenagem Interna | Tapete drenante entre contato do maciço e berma de reforço e dreno de pé. |
| Drenagem Superficial | Canaletas e descritas d'água de concreto. |
| Vertedouro Operacional | Vertedouro tipo torre, onde as águas captadas são conduzidas por meio de uma galeria enterrada no maciço da barragem até um bueiro de descarga em seção retangular. |
| Vertedouro de Fechamento | Inicia-se na Elevação 740,0 m e base inicial de 32,0m variando até 4,5m, mas mantendo a seção trapezoidal na ombreira direita. Possui paredes laterais em concreto armado de 1,50m de altura, declividade 3% e taludes laterais com inclinação 1V:1H. |

CÁLCULO DA PROBABILIDADE DOS MODOS DE FALHAS

- MODO DE FALHA GALGAMENTO

Na Figura 0.103 são apresentados os parâmetros geomorfológicos para a bacia de contribuição delimitada e na Tabela 0.75 a ponderação do CN de acordo com os usos do solo definidos.

Tabela 0.74 - Parâmetros Geomorfológicos da bacia considerada.

| Estrutura | Área de Drenagem (km ²) | Número de Curva Ponderado (CN II) | Abstração Inicial (mm) | Tempo de Concentração (min) | Lag-time (min) |
|------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|-----------------------------|----------------|
| Barragem C | 8,06 | 67 | 25 | 33,31 | 19,99 |

Tabela 0.75 - Valores de CN para cada tipo de solo na bacia de contribuição.

| Classes de uso | CN | Área (km ²) |
|-------------------|-----|-------------------------|
| ÁREA DE LAGO | 100 | 0,14 |
| ÁREA URBANA | 88 | 0,09 |
| ROCHA | 87 | 1,92 |
| SOLO EXPOSTO | 82 | 0,71 |
| PILHA | 79 | 0,43 |
| VEGETAÇÃO ARBÓREA | 55 | 5,07 |

O volume de amortecimento de cheia representa o volume alocado entre a soleira do sistema extravasor e a crista da barragem.

A partir da base topográfica, foi possível a definição da curva cota-área-volume apresentada na Figura 0.103. A Tabela 0.76 e Tabela 0.77 mostram a curva cota-volume do reservatório, sendo todos esses volumes acumulados.

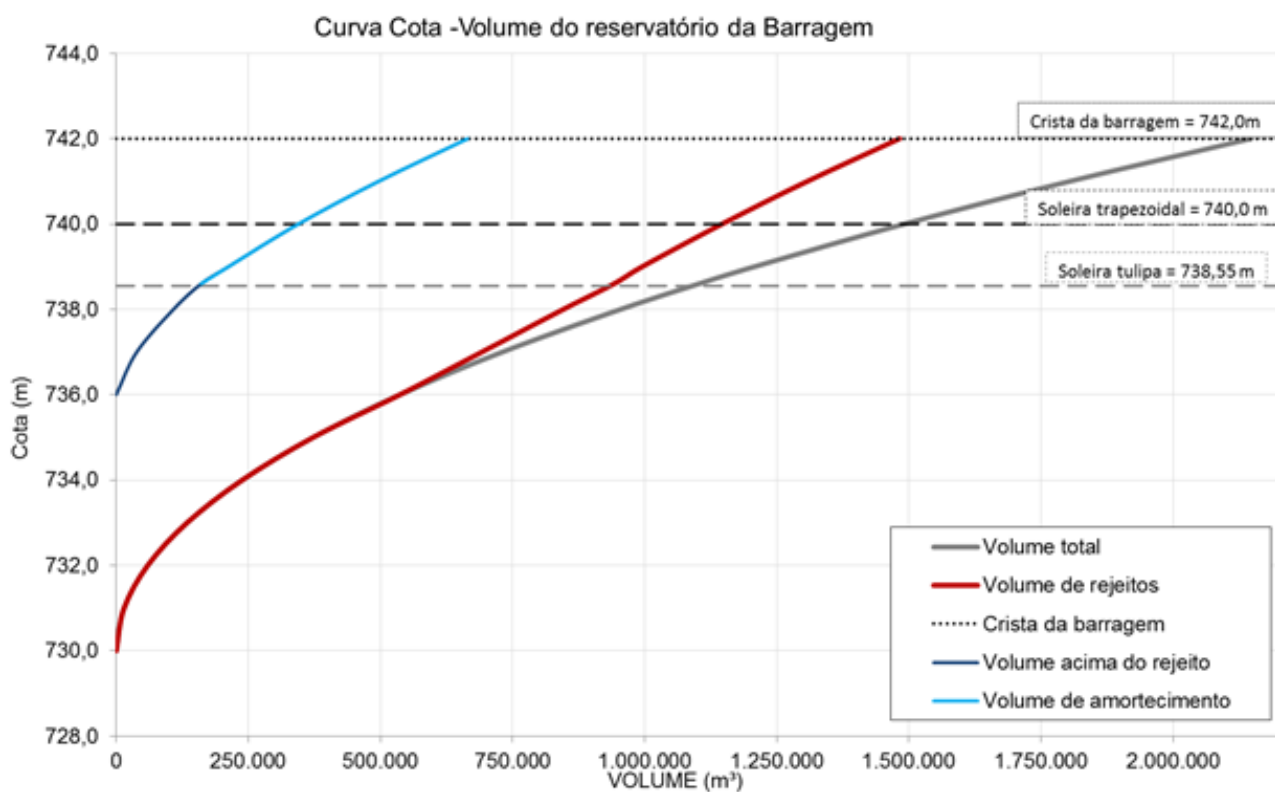


Figura 0.103 - Curva cota-área-volume de água no reservatório C.

Tabela 0.76 - Curva cota-área-volume de água no reservatório C.

| Elevação | Áreas (m ²) | Volume de água (m ³) |
|----------|-------------------------|----------------------------------|
| 736,0 | 23.438 | 0,0 |
| 737,0 | 54.181 | 38.809,0 |
| 738,0 | 84.845 | 108.323,0 |
| 738,55 | 105.837 | 160.760,0 |
| 739,0 | 123.458 | 212.352,0 |
| 740,0 | 141.119 | 344.640,0 |
| 741,0 | 162.456 | 496.428,0 |
| 742,0 | 174.452 | 664.882,0 |

Tabela 0.77 - Curvas cota-volume da barragem C.

| Elevação (m) | Volume acumulado total (1000 m ³) | Volume acumulado 70% (1000 m ³) |
|--------------|--|--|
| 738,00 | 0,00 | 0,00 |
| 739,00 | 104,18 | 72,93 |
| 740,00 | 241,59 | 169,12 |
| 741,00 | 398,37 | 278,86 |
| 742,00 | 566,61 | 396,63 |

O sistema extravasor da barragem C é composto por uma torre com stop-logs, cuja soleira foi considerada na elevação 738,55 m. A torre da tulipa conecta-se a uma galeria retangular sob o maciço que conduz a vazão efluente até um bueiro em seção retangular de dimensões 1,0mx1,60m. Após o bueiro a vazão efluente é direcionada para uma bacia de dissipação escavada em terreno natural e sem revestimento.

Além do vertedouro tipo tulipa, a barragem possui também um vertedouro trapezoidal, projetado para funcionar como extravasor principal após tamponamento da tulipa. As duas estruturas funcionam em conjunto.

O extravasor trapezoidal possui dimensão de base inicial de 32,0m variando até 4,5m, mas mantendo a seção trapezoidal na ombreira direita. Possui paredes laterais em concreto armado de 1,50m de altura, declividade 3% e taludes laterais com inclinação 1V:1H. Para este estudo será considerada a elevação da soleira na cota 738,55m.

Para verificação da capacidade de vertimento do sistema extravasor da barragem C frente à cheia extremas, foi considerada a vazão de descarga de ambas as estruturas extravasoras.

A curva de descarga final que representa a descarga resultante foi determinada a partir da relação mais restritiva, considerando como limitante o menor valor de vazão defluente, conforme apresentado na Figura 0.104.

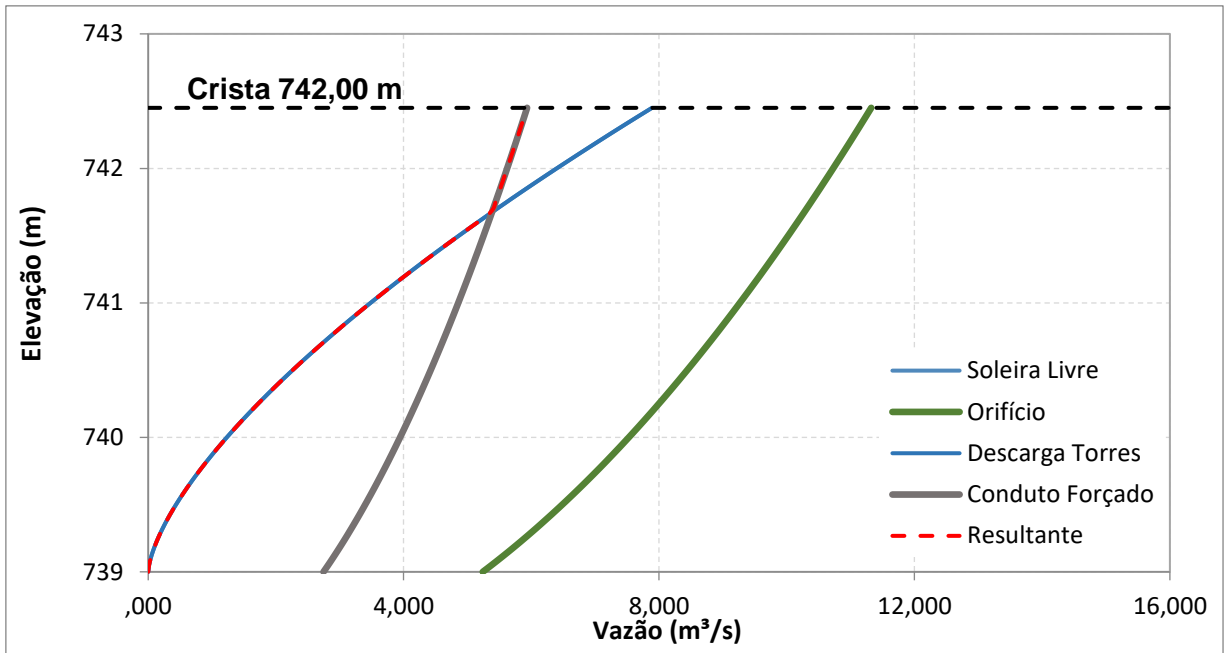


Figura 0.104 - Curva de descarga do sistema extravasor da Barragem C.

Para o extravasor emergencial (trapezoidal), a equação utilizada foi a de soleira livre. A Figura 0.105 apresenta a curva de descarga do sistema extravasor.

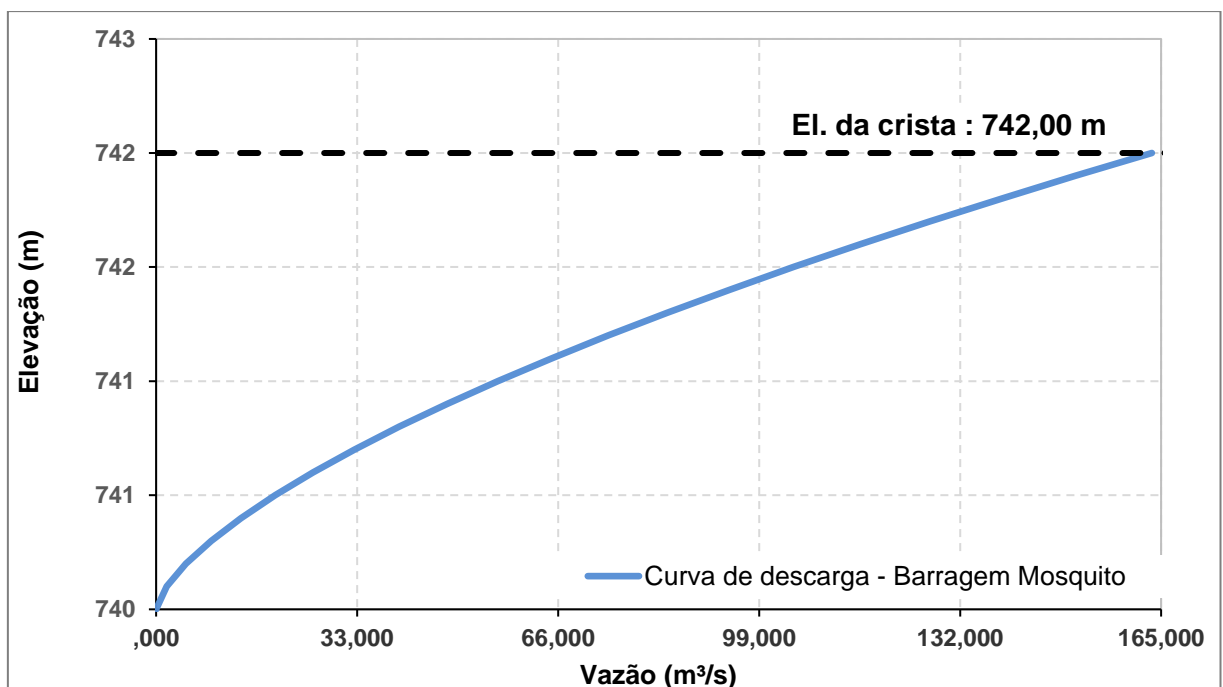


Figura 0.105 - Curva de descarga – Extravasor de Emergência (Trapezoidal).

A Tabela 0.78 apresenta a relação PDF obtida para cada um dos tempos de retorno.

Tabela 0.78 - Relação precipitação-duração-frequência.

| Duração | Precipitação (mm) | | | | | | | |
|----------|-------------------------|------|--------|--------|--------|--------|---------|------|
| | Tempo de retorno (anos) | | | | | | | |
| | 500 | 1000 | 10.000 | 30.000 | 50.000 | 80.000 | 100.000 | PMP |
| 15 min | 60,8 | 64,6 | 76,5 | 82,1 | 84,5 | 86,7 | 87,7 | 77,7 |
| 20 min | 71,6 | 75,9 | 89,8 | 96,4 | 99,2 | 101,8 | 103 | 91,2 |
| 30 min | 86,9 | 92 | 108 | 115,9 | 119,3 | 122,4 | 123,9 | 110 |
| 1 hora | 113 | 119 | 140 | 150,3 | 154,7 | 158,7 | 160,6 | 142 |
| 2 horas | 154 | 163 | 195 | 227,2 | 235,4 | 243 | 246,6 | 212 |
| 3 horas | 178 | 189 | 227 | 259,7 | 269,1 | 277,8 | 282 | 242 |
| 4 horas | 195 | 207 | 249 | 283,1 | 293,5 | 303 | 307,5 | 264 |
| 6 horas | 219 | 233 | 281 | 315,1 | 326,7 | 337,3 | 342,3 | 294 |
| 8 horas | 236 | 251 | 304 | 338,2 | 350,6 | 362,1 | 367,5 | 315 |
| 10 horas | 249 | 266 | 321 | 349,7 | 362,2 | 373,7 | 379,2 | 327 |
| 12 horas | 259 | 277 | 336 | 367 | 380,5 | 392,9 | 398,8 | 342 |
| 18 horas | 283 | 303 | 367 | 400,9 | 415,6 | 429,2 | 435,6 | 374 |
| 24 horas | 300 | 321 | 390 | 426 | 441,7 | 456,1 | 462,9 | 397 |
| 2 dias | 392 | 419 | 510 | 557,9 | 578,6 | 597,7 | 606,8 | 447 |
| 3 dias | 477 | 510 | 621 | 678,7 | 703,8 | 727 | 738 | 520 |
| 5 dias | 609 | 651 | 792 | 864,9 | 896,9 | 926,2 | 940,2 | 666 |
| 7 dias | 716 | 766 | 930 | 1016,1 | 1053,5 | 1087,9 | 1104,2 | 902 |
| 10 dias | 846 | 904 | 1096 | 1196,7 | 1240,5 | 1280,7 | 1299,9 | 1002 |
| 15 dias | 1044 | 1116 | 1356 | 1480,9 | 1535,4 | 1585,5 | 1609,3 | 1139 |
| 20 dias | 1192 | 1273 | 1544 | 1685,9 | 1747,6 | 1804,3 | 1831,3 | 1395 |
| 30 dias | 1427 | 1523 | 1842 | 2009 | 2081,6 | 2148,4 | 2180,2 | 1607 |

A simulação do sistema hidrológico foi realizada com os parâmetros e métodos apresentados para todas as durações de chuvas e tempos de retorno considerados. Com isso, procurou-se identificar a duração crítica do sistema, ou seja, a duração do evento pluviométrico responsável pela ocorrência do galgamento do maciço ou pela maior sobrelevação do nível d'água no reservatório.

A Tabela 0.79 e a Figura 0.106 apresentam os resultados da simulação hidrológica decorrente da passagem da Cheia deca milenar pelo reservatório da barragem C.

Tabela 0.79 - Resultados do trânsito de cheias no reservatório da barragem C.

| Duração | Vazão Afluente (m³/s) | Vazão Defluente (m³/s) | Elevação (m) |
|---------|-----------------------|------------------------|--------------|
| 1h | 200,83 | 93,38 | 741,34 |
| 2h | 243,22 | 169,29 | 742 |
| 3h | 230,35 | 206,95 | 742,03 |
| 4h | 208,25 | 194,91 | 742,02 |
| 6h | 170,74 | 159,14 | 741,92 |
| 8h | 144,71 | 139,52 | 741,76 |

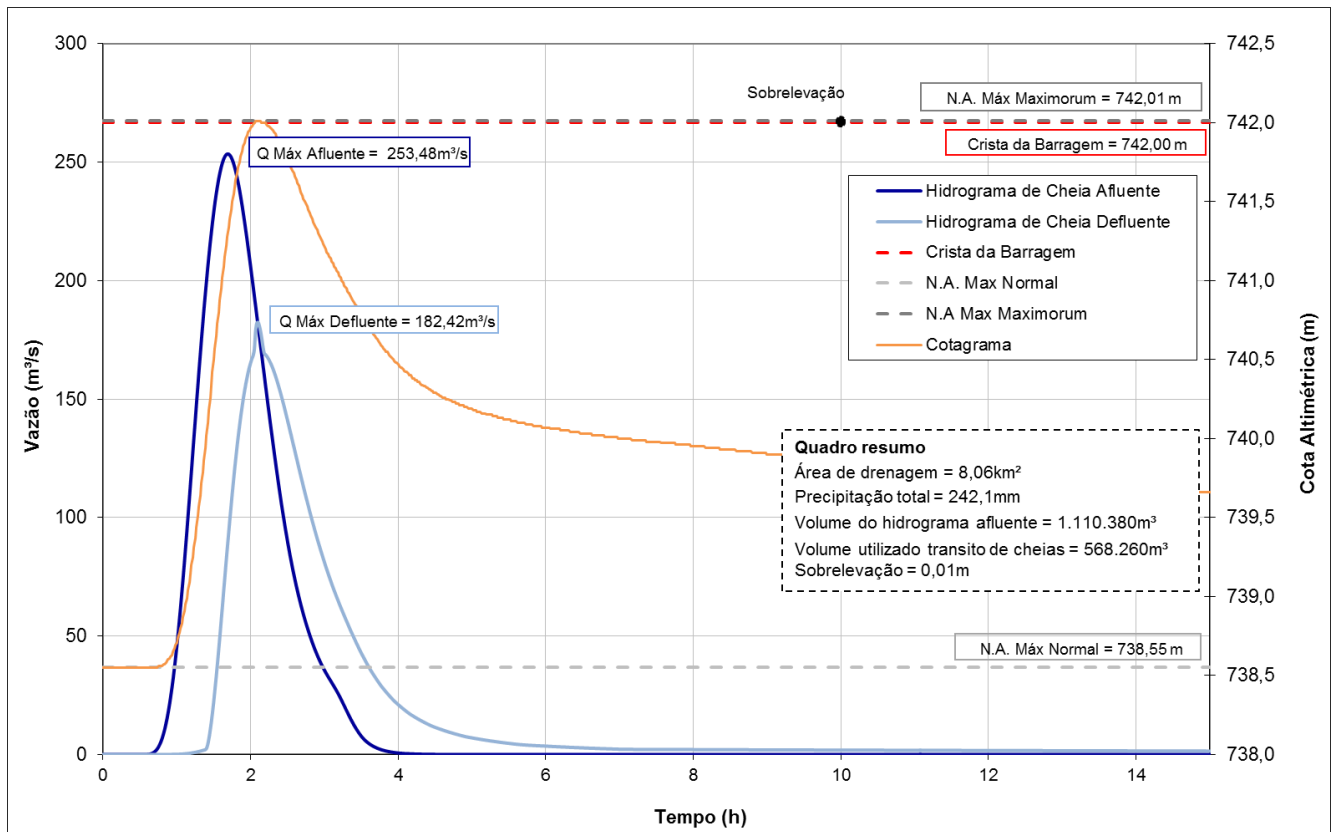


Figura 0.106 - Resultados do trânsito de cheias no reservatório da barragem C (PMP e duração crítica de 18 horas).

Os estudos indicaram que há galgamento da estrutura nestas condições para o período de retorno de 10.000 anos, com sobrelevação de 0,03m.

A fim de determinar o volume livre necessário para a não ocorrência de galgamento, foram geradas novas curvas cota volume de modo que a elevação máxima do trânsito de cheias

correspondesse à altura da crista da barragem (742,0m). Essa análise foi realizada para as precipitações de tempo de retorno 1.000 anos, 10.000 anos e PMP.

As curvas cota-volume geradas estão apresentadas na Tabela 0.80 e na Figura 0.107.

Tabela 0.80 - Curva cota-volume do reservatório da barragem C para borda livre nula.

| Elevação (m) | Volume acumulado total (1000 m ³) | Volume acumulado TR 1.000 (1000 m ³) | Volume acumulado TR 10.000 (1000 m ³) | Volume acumulado PMP (1000 m ³) |
|--------------|---|--|---|---|
| 738 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 739 | 104,18 | 0 | 85,17 | 106,85 |
| 740 | 241,59 | 0 | 197,5 | 247,77 |
| 741 | 398,37 | 0 | 325,67 | 408,55 |
| 742 | 566,61 | 0 | 463,2 | 581,09 |

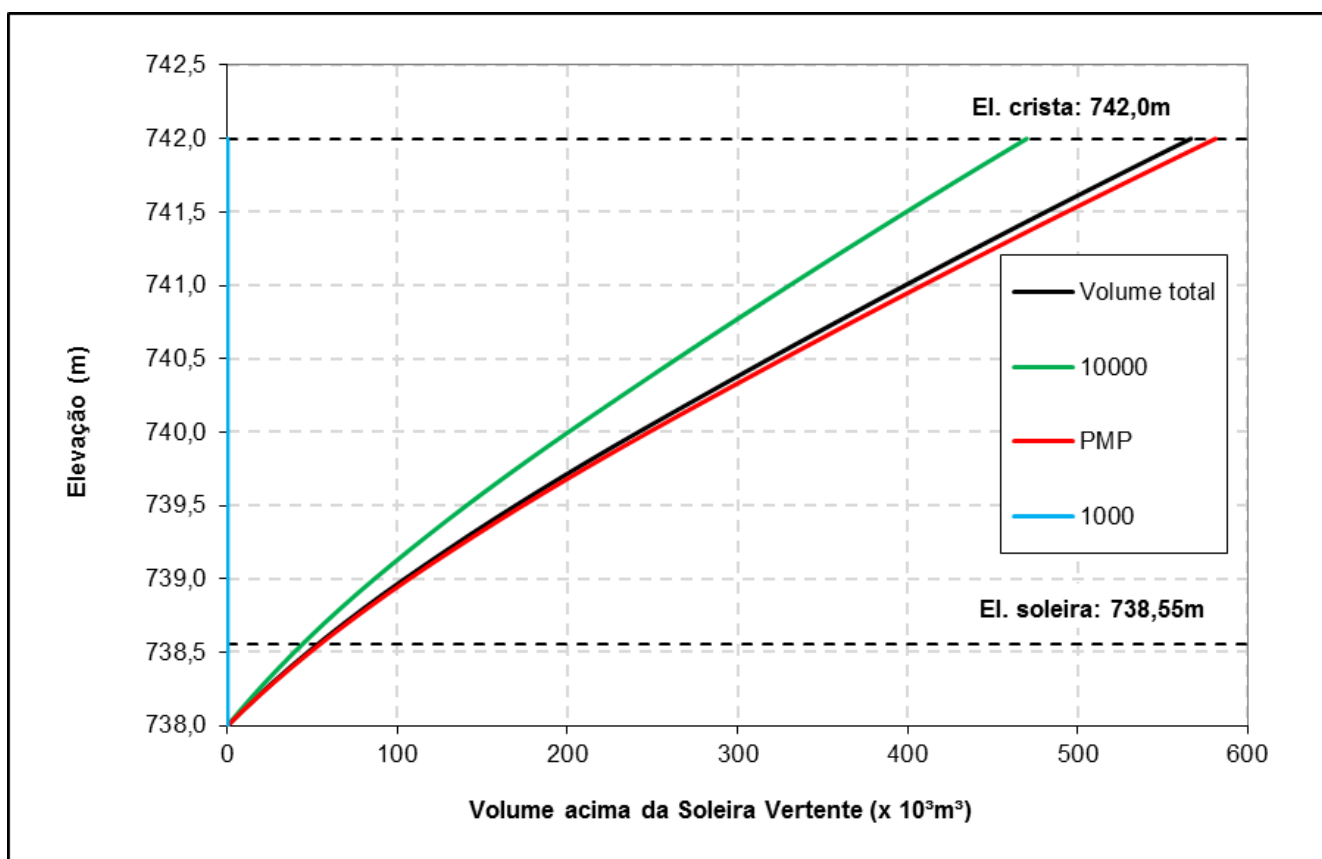


Figura 0.107 - Curva cota-volume do reservatório da barragem C – borda livre nula.

A Tabela 0.81 apresenta o resumo dos resultados obtidos.

Tabela 0.81 - Resultados do trânsito de cheia para as durações críticas.

| Variável | TR 1.000 | TR 10.000 | PMP |
|--|-------------|--------------|--------|
| Volume necessário (1000m ³) | 0 | 470,02 | 581,09 |
| Duração crítica (horas) | 4 | 3 | 3 |
| Vazão Máxima Afluente (m ³ /s) | 158,3 | 230,35 | 253,48 |
| Vazão Máxima Defluente (m ³ /s) | 105,9 | 169,45 | 169,41 |
| Elevação NA Máx Maximorum (m) | 741,46 | 742 | 742 |
| Borda Livre disponível (m) | 0,54 | 0 | 0 |

A partir dos resultados percebe-se que o volume necessário para a passagem da cheia correspondente ao tempo de retorno de 10.000 anos é de 83% do volume atual, podendo ocorrer uma ocupação de até 17%. Para a PMP, o reservatório atual não é suficiente para o amortecimento da cheia, sendo necessário um acréscimo de 3% do volume atual para que ocorra a borda nula.

No caso da cheia correspondente à precipitação de 1.000 anos de recorrência, ainda que 100% do volume para trânsito de cheias seja ocupado, o extravasor trapezoidal é capaz de amortecer toda a vazão gerada.

A barragem sofreria galgamento para a cheia decorrente da precipitação de 10.000 anos de tempo de retorno, com 0,03m de sobrelevação para a duração crítica. Desse modo, define-se que a probabilidade de ruptura por galgamento da barragem C para este cenário é igual a 1×10^{-4} .

- MODO DE FALHA INSTABILIZAÇÃO

- DEFINIÇÃO DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO E REALIZAÇÃO DE ANÁLISE DETERMINÍSTICA;

Os modelos utilizados no cenário 1 e cenário 2 estão apresentados na Figura 0.108 e Figura 0.109, respectivamente.

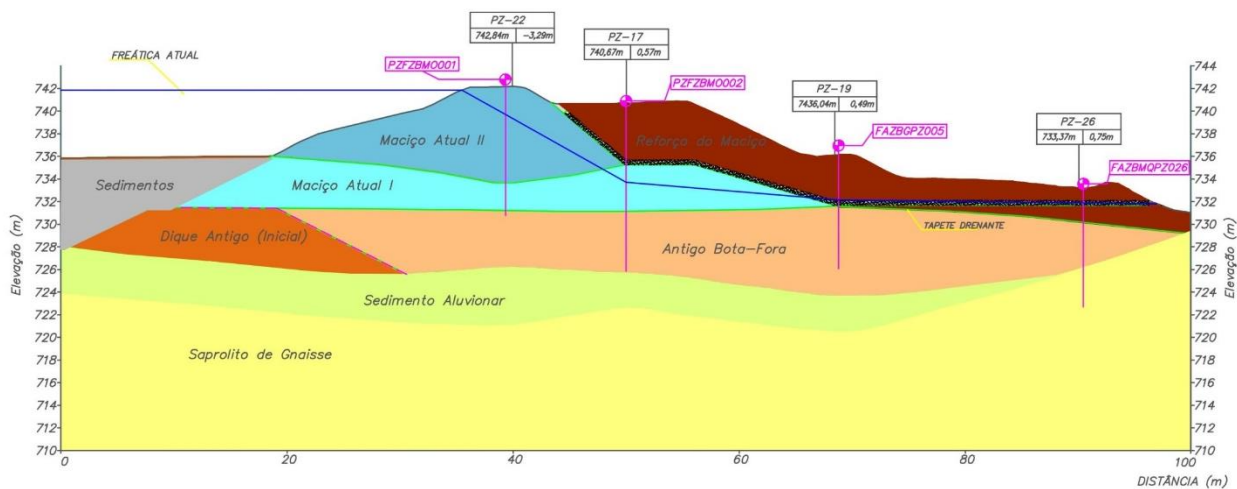


Figura 0.108 - Modelo para as análises de estabilidade – Barragem C. – Cenário 1

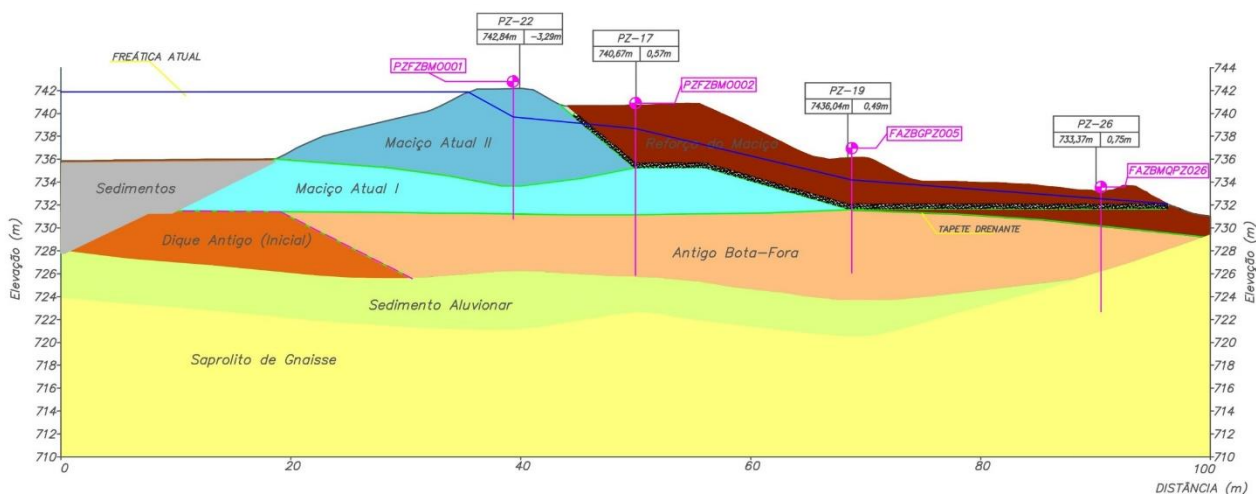


Figura 0.109 - Modelo para as análises de estabilidade – Barragem C. – Cenário 2.

- Parâmetros Geotécnicos

A Barragem C é composta por um Aterro de Reforço à jusante de aproximadamente 4m de espessura composto por material argilo-siltoso com N_{SPT} médio igual a 10.

O aterro atual foi dividido em duas partes, pois apresentou resistências muito distintas a partir da cota 736 m no ensaio de SPT realizado em 2017. O Aterro Atual II, posicionado abaixo da cota 736 m, apresenta características argilo-siltosa com valores de N_{SPT} médio de 11.

O Aterro Atual I é uma camada de aproximadamente 4m de espessura de material silto-argiloso e argilo-siltoso, localizada sob o Aterro Atual II, e apresenta N_{SPT} médio de 6.

Sotoposto ao aterro atual, está o Dique Antigo, formado por material silto-argiloso rico em ferro, com N_{SPT} variando entre 3 e 16, com valor médio de 7, demonstrando a grande variabilidade de resistência deste material. A partir da análise das sondagens, acredita-se que este material tenha sido disposto sem controle de compactação.

Os parâmetros para os materiais que compõem o modelo foram determinados com base em correlações com o N_{SPT} , devido à insuficiência de ensaios de laboratório. O único ensaio triaxial executado foi resultado da coleta de uma amostra indeformada na crista da barragem, apresentando parâmetro coesivo elevado e não característico com a descrição geológica do solo. Os materiais da barragem obtiveram o ângulo de atrito estimado segundo a expressão desenvolvida por Teixeira (1996), descrita a seguir :

$$\phi' = \sqrt{20N} + 15 \quad (4.3)$$

A fórmula supracitada foi desenvolvida para solos arenosos. Pelo fato de o material presente no barramento ser caracterizado por solos argilo siltosos e silte argilosos, optou-se por subtrair 4° no valor do ângulo de atrito para os materiais.

Os parâmetros para os materiais que compõem o modelo foram determinados com base na média nos ensaios de laboratórios realizados durante a execução das obras e, também, durante a elaboração do projeto detalhado (Tabela 0.82).

Tabela 0.82 – Parâmetros Médios.

| MATERIAIS | DESCRIÇÃO GEOLÓGICA | N_{SPT} | N_{SPT}^{60} | Parâmetros drenados | | | Parâmetros não drenados |
|-----------------|---------------------|-----------|----------------|---------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| | | | | ϕ' (°) | c' (KN/m ²) | γ (KN/m ³) | Su/σ'_{vo} |
| Aterro Atual I | Argilo Siltoso | 6 | 7 | 23,5 | 8 | 18 | - |
| Aterro Atual II | Argilo Siltoso | 11 | 13 | 27 | 14 | 18,2 | - |
| Aterro Reforço | Argilo Siltoso | 11 | 12 | 26,5 | 18 | 17 | - |
| Dique Antigo | Silte Argiloso | 7 | 8 | 23,5 | 9 | 18 | - |

| | | | | | | | |
|------------------|----------------|---|---|------|----|----|------|
| Antigo Bota Fora | Silte Argiloso | 7 | 8 | 23,5 | 9 | 18 | - |
| Aluvião | Areno Siltoso | 6 | 7 | 26 | 0 | 17 | - |
| Saprolito | Silto Argiloso | 6 | 7 | 8 | 23 | 17 | - |
| Sedimentos | | | | | | | 0,22 |

- Níveis Piezométricos

Para o modo de falha **instabilização** serão realizados estudos de dois cenários distintos, sendo eles:

- **Cenário 1:** condição normal de operação.

Reservatório com nível d'água máximo *maximorum* da soleira do vertedouro da barragem (EL. 741,87 m), com níveis piezométricos máximos obtidos dos históricos de leituras. (Figura 0.108).

- **Cenário 2:** condição crítica hipotética.

Reservatório com nível d'água máximo *maximorum* na soleira do vertedouro da barragem (EL. 741,87 m) com o aumento da poropressão no maciço da barragem. A piezometria foi arbitrada, considerando que a linha freática seria elevada até o dreno invertido executado juntamente com o aterro de reforço (Figura 0.109). apresenta a condição crítica da operação.

- ANÁLISES DE ESTABILIDADE DETERMINÍSTICAS

As análises de estabilidade da Barragem A foram realizadas em condições de mobilização de resistências drenadas, considerando 02 cenários (Figura 0.110 e Figura 0.111) que se diferenciam pela condição do nível freático no interior do maciço. Para a seleção preliminar dos parâmetros que influenciam o fator de segurança (FS), foi elaborada análise de estabilidade utilizando a seção apresentada e os parâmetros médios apresentados na Tabela 0.82. Nota-se que em todas as análises, Figura 0.110 e Figura 0.111, os materiais críticos (interceptados pelo círculo de ruptura) foram os Aterro atuais I e II, o antigo bota-fora e os aterros.

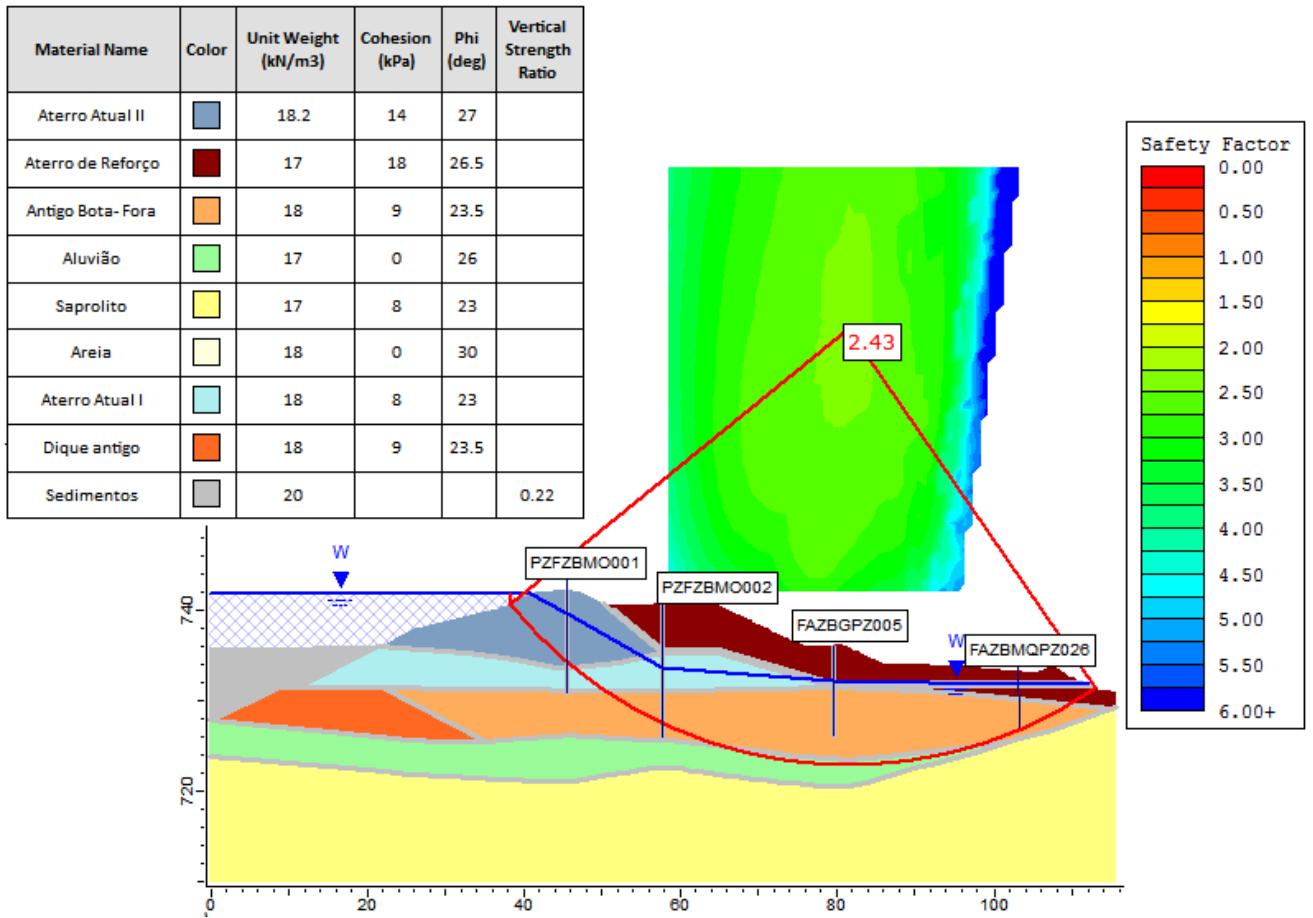


Figura 0.110 - Resultado da Análise de estabilidade determinística na Cenário 1 – Condição Normal de Operação.

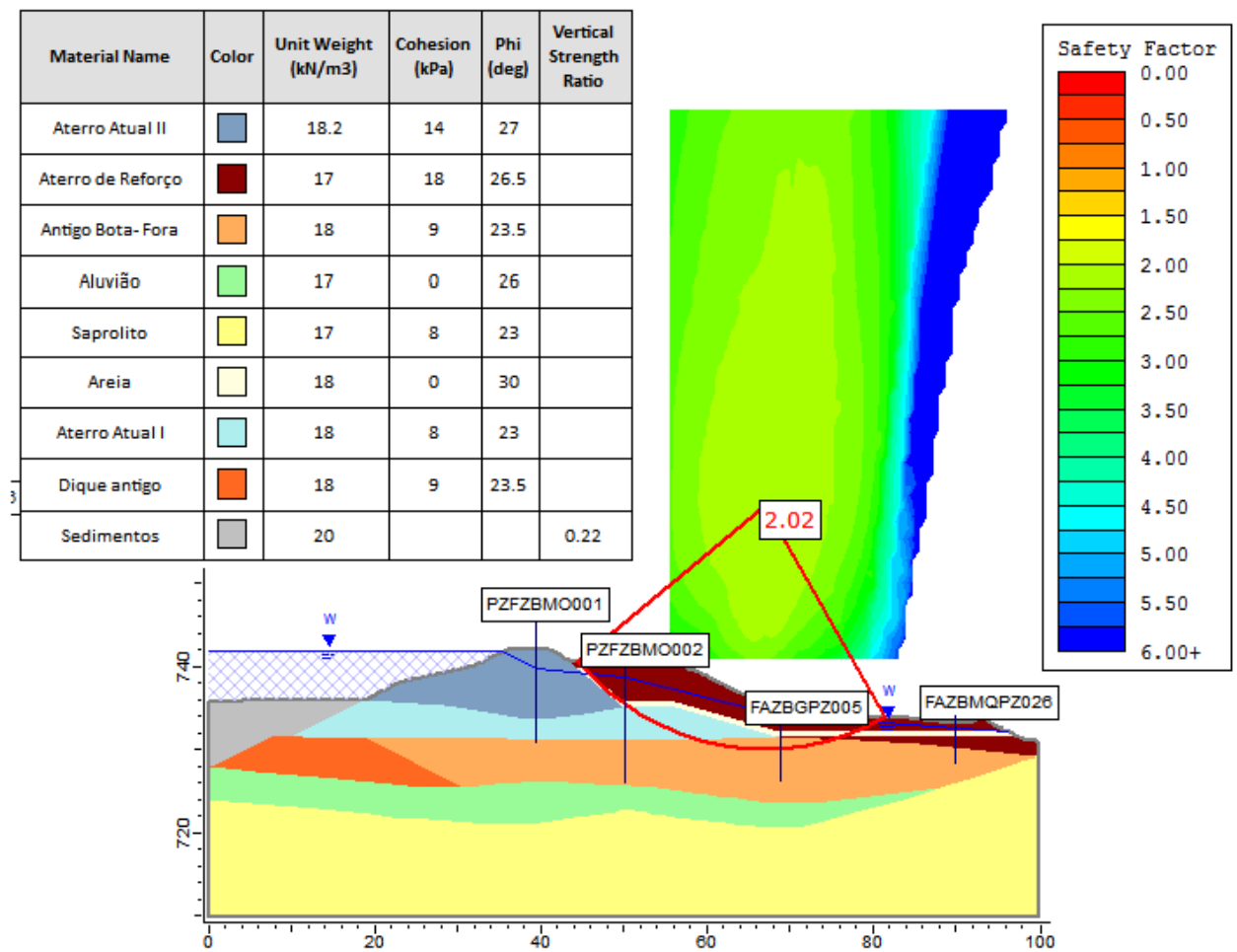


Figura 0.111 - Resultado da Análise de estabilidade determinística na Cenário 2 – Condição Crítica.

- VARIABILIDADE DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS

Conforme apresentado no item anterior, em todas as análises, os materiais críticos (interceptados pelo círculo de ruptura) foram o aterro atual I e II, aterro de reforço e antigo bota-fora. Para estes materiais, realizou-se uma análise estatística dos resultados dos parâmetros correlacionados, obtendo-se os valores médios (μ) e desvios-padrão (σ) apresentados na Tabela 0.83. Para os demais materiais, foram adotados os mesmos valores médios obtidos nas correlações com os valores de N_{SPT} .

As variáveis aleatórias foram definidas considerando 11 furos de sondagens mistas, obtendo-se assim, a média, o desvio padrão e o coeficiente de variância:

- Para o Dique Antigo/Antigo Bota foram considerados 19 ensaios SPT, executados em profundidades distintas dos furos de sondagens realizados na Barragem. O ângulo de atrito, bem como a coesão, foi estimado por meio de correlações, conforme indicado anteriormente. Foi adotada a função distribuição de probabilidade normal para ângulo de atrito e função distribuição log normal para coesão deste material;
- Para o Aterro Atual I foram considerados 7 ensaios SPT, executados em profundidades distintas dos furos de sondagens realizados na Barragem. O ângulo de atrito, bem como a coesão, fora estimado por meio de correlações, conforme indicado anteriormente. Foi adotada a função distribuição de probabilidade normal para ângulo de atrito e função distribuição log normal para coesão deste material;
- Para o Aterro Atual II foram considerados 7 ensaios SPT, executados em profundidades distintas dos furos de sondagens realizados na Barragem. O ângulo de atrito, bem como a coesão, fora estimado por meio de correlações, conforme indicado anteriormente. Foi adotada a função distribuição de probabilidade normal para ângulo de atrito e função distribuição log normal para coesão deste material;
- Para o Aluvião foram considerados 11 ensaios SPT, executados em profundidades distintas dos furos de sondagens realizados na Barragem. O ângulo de atrito, bem como a coesão, fora estimado por meio de correlações, conforme indicado anteriormente. Foi adotado a função distribuição de probabilidade normal para ângulo de atrito e função distribuição log normal para coesão deste material;
- Para o Aterro-Reforço foram considerados 6 ensaios SPT, executados em profundidades distintas dos furos de sondagens realizados na Barragem. O ângulo de atrito, bem como a coesão, fora estimado por meio de correlações, conforme indicado anteriormente. Foi adotada a função distribuição de probabilidade normal para ângulo de atrito e função distribuição log normal para coesão deste material;
- Para o Saprolito foram considerados 22 ensaios SPT, executados em profundidades distintas dos furos de sondagens realizados na Barragem. O ângulo de atrito, bem como a coesão, fora estimado por meio de correlações, conforme indicado anteriormente. Foi adotada a função distribuição de probabilidade normal para ângulo de atrito e função distribuição log normal para coesão deste material.

A Tabela 0.83 sintetiza os cálculos obtidos para variabilidade de parâmetros geotécnicos.

Tabela 0.83 - Variabilidade dos parâmetros geotécnicos.

| MATERIAIS | Parâmetros | |
|--------------------|-----------------|---------------------------|
| | Drenados | |
| | ϕ' (°) | c' (KN/m ²) |
| Aterro Atual I | $\mu = 23,0$ | $\mu = 8,0$ |
| | $\sigma = 1,7$ | $\sigma = 2,2$ |
| | CV = 7,6% | CV = 29,4% |
| | (distr. Normal) | (distr. Log-normal) |
| Aterro Atual II | $\mu = 27,0$ | $\mu = 14,0$ |
| | $\sigma = 0,8$ | $\sigma = 1,7$ |
| | CV = 2,9% | CV = 12,4% |
| | (distr. Normal) | (distr. Log-normal) |
| Aterro Reforço | $\mu = 26,5$ | $\mu = 18,0$ |
| | $\sigma = 3,4$ | $\sigma = 6,6$ |
| | CV = 13,0% | CV = 36,9% |
| | (distr. Normal) | (distr. Log-normal) |
| Antigo Bota - Fora | $\mu = 23,5$ | $\mu = 9,0$ |
| | $\sigma = 3,2$ | $\sigma = 4,4$ |
| | CV = 13,7% | CV = 48,6% |
| | (distr. Normal) | (distr. Log-normal) |
| Dique Antigo | $\mu = 23,5$ | $\mu = 9,0$ |
| | $\sigma = 3,2$ | $\sigma = 4,4$ |
| | CV = 13,7% | CV = 48,6% |
| | (distr. Normal) | (distr. Log-normal) |
| Aluvião | $\mu = 26,0$ | $\mu = 0,0$ |
| | $\sigma = 2,7$ | $\sigma = -$ |
| | CV = 10,4% | CV = - |
| | (distr. Normal) | (distr. Log-normal) |

Como já mencionado esses parâmetros geotécnicos foram baseados em investigações de sondagens, que não foram realizados ensaios de laboratórios nos materiais condicionantes para a estabilidade da barragem.

- ANÁLISES PROBABILÍSTICAS

○ MÉTODO DE FOSM

No método FOSM foram realizadas sete análises considerando-se, para os parâmetros geotécnicos (ângulo de atrito efetivo e coesão efetiva), os valores médios e os desvios-padrão apresentados na Tabela 0.83.

As análises de estabilidade do cenário 1, bem como os respectivos fatores de segurança obtidos, são apresentadas na Figura 0.112, Figura 0.113, Figura 0.114, Figura 0.115, Figura 0.116 e Figura 0.117 . Na Tabela 0.84 são apresentadas as contribuições de cada parâmetro e de cada material nas análises de estabilidade.

Tabela 0.84 - Parâmetros utilizados e resultados das análises de estabilidade.

| MATERIAL | PARÂMETRO ANALISADO | PARAMETRO UTILIZADO | F.S | dX_i | dFS_i | dFS_i/dX_i | $V[X_i]$ | $(dFS_i/dX_i)^2 \times V[X_i]$ | CONTRIBUIÇÃO |
|------------------|---------------------|--------------------------------------|------|--------|---------|--------------|----------|--------------------------------|--------------|
| Aterro Reforço | Coesão | $\gamma = 17,0$ KN/m ³ | 2,43 | 1,8 | -0 | -0,0022 | 43,56 | 0,0002 | 1,30% |
| | efetiva | $c' = 19,80$ KN/m ² | | | | | | | |
| | | $\phi' = 26,50^\circ$ | | | | | | | |
| | Ângulo de | $\gamma = 17,0$ KN/m ³ | 2,43 | 2,65 | -0 | -0,0015 | 11,56 | 0 | 0,20% |
| | atrito efetivo | $c' = 18,00$ kPa | | | | | | | |
| | | $\phi' = 29,15^\circ$ | | | | | | | |
| Aterro Atual I | Coesão | $\gamma = 18,0$ KN/m ³ | 2,43 | 0,8 | -0 | -0,0025 | 4,84 | 0 | 0,20% |
| | efetiva | $c' = 8,80$ kPa | | | | | | | |
| | | $\phi' = 23,00^\circ$ | | | | | | | |
| | Ângulo de | $\gamma = 18,0$ KN/m ³ | 2,44 | 2,3 | -0,01 | -0,0048 | 3,24 | 0,0001 | 0,50% |
| | atrito efetivo | $c' = 8,00$ kPa | | | | | | | |
| | | $\phi' = 25,30^\circ$ | | | | | | | |
| Antigo Bota-Fora | Coesão | $\gamma = 18,0$ KN/m ³ | 2,44 | 0,9 | -0,02 | -0,0167 | 19,36 | 0,0054 | 33,30% |
| | efetiva | $c' = 9,90$ kPa | | | | | | | |
| | | $\phi' = 23,50^\circ$ | | | | | | | |
| | Ângulo de | $\gamma = 18,0$ KN/m ³ | 2,5 | 2,35 | -0,08 | -0,0319 | 10,24 | 0,0104 | 64,57% |
| | atrito efetivo | $c' = 9,00$ kPa | | | | | | | |
| | | $\phi' = 25,85^\circ$ | | | | | | | |

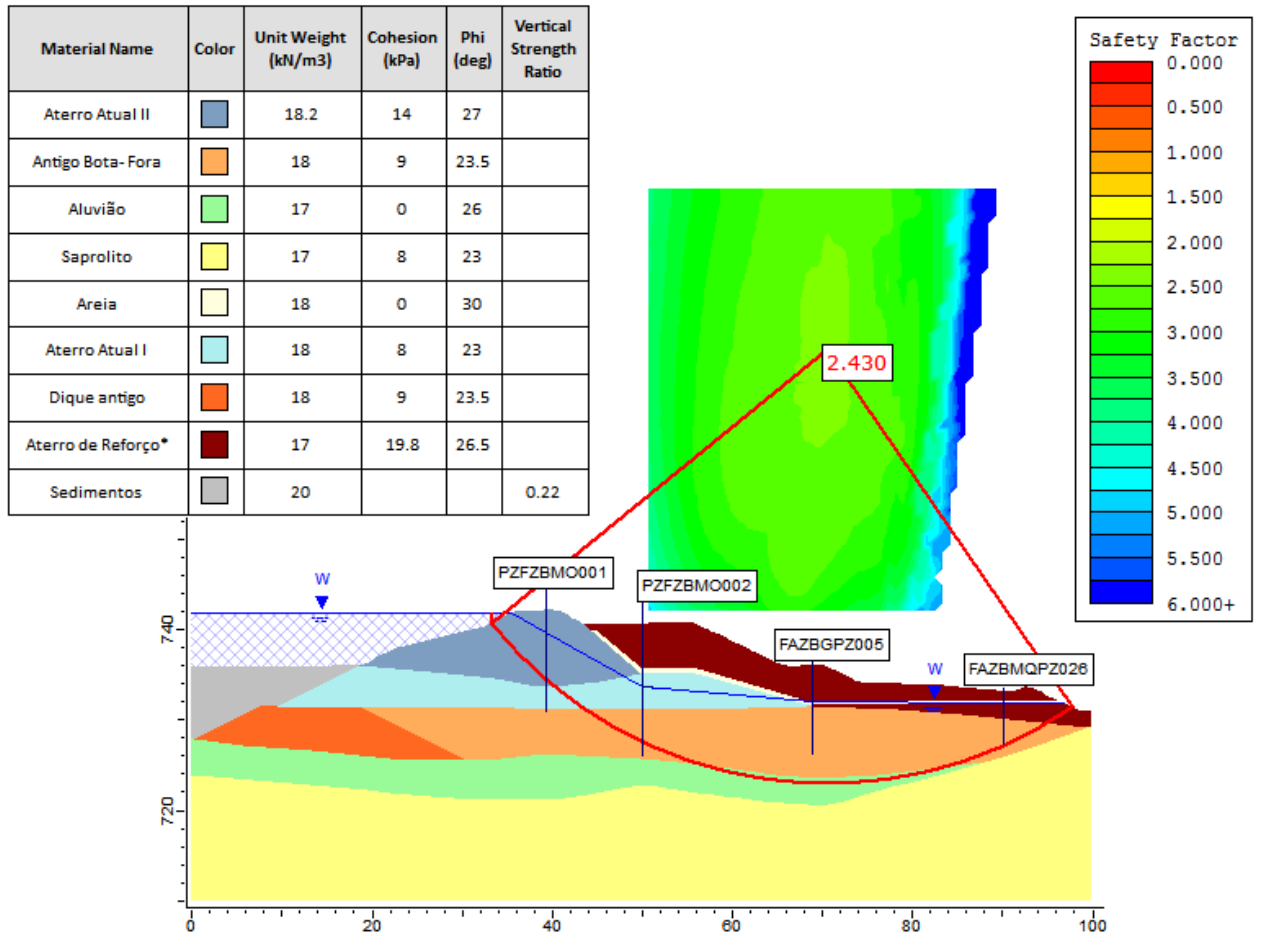


Figura 0.112 – Análise de Estabilidade – Variação da coesão do Aterro de Reforço do cenário 1.

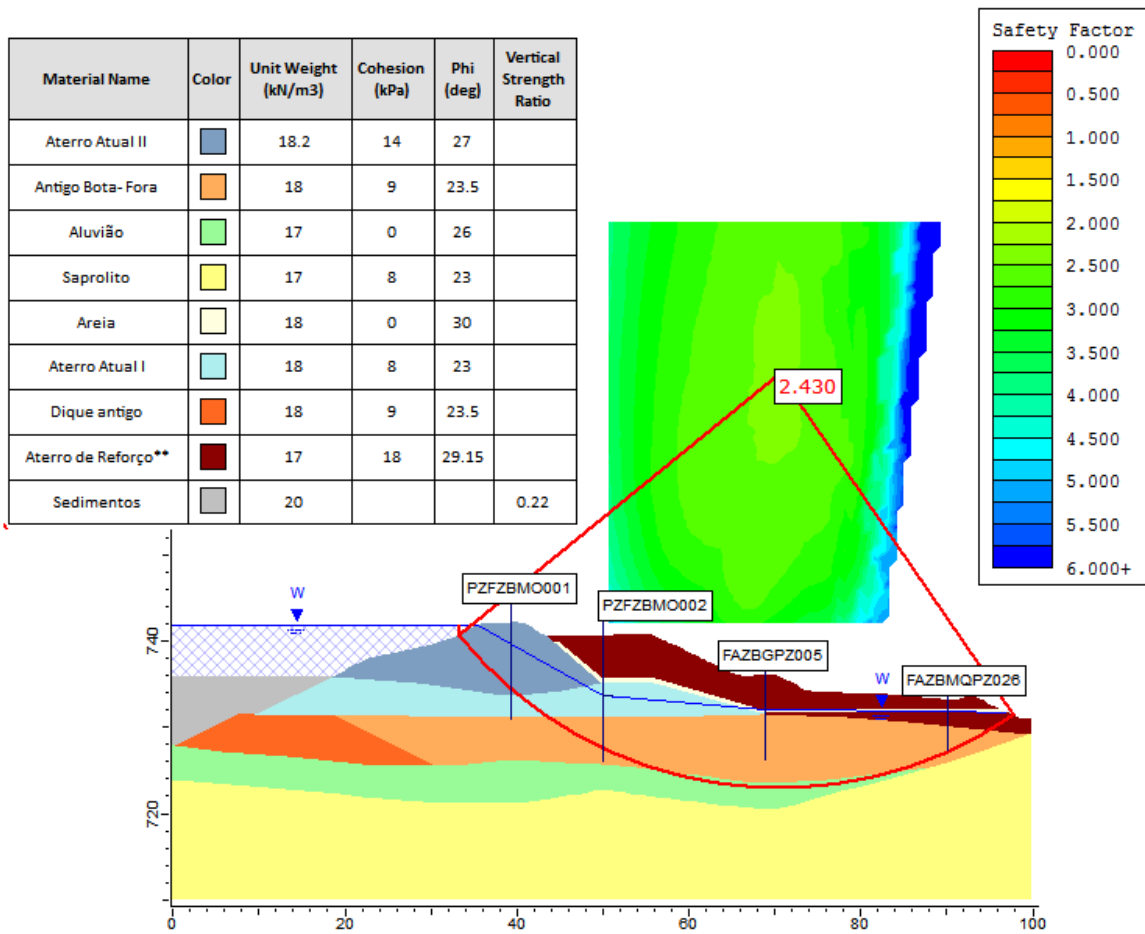


Figura 0.113 – Análise de Estabilidade – Variação do ângulo de atrito do Aterro de Reforço do cenário 1.

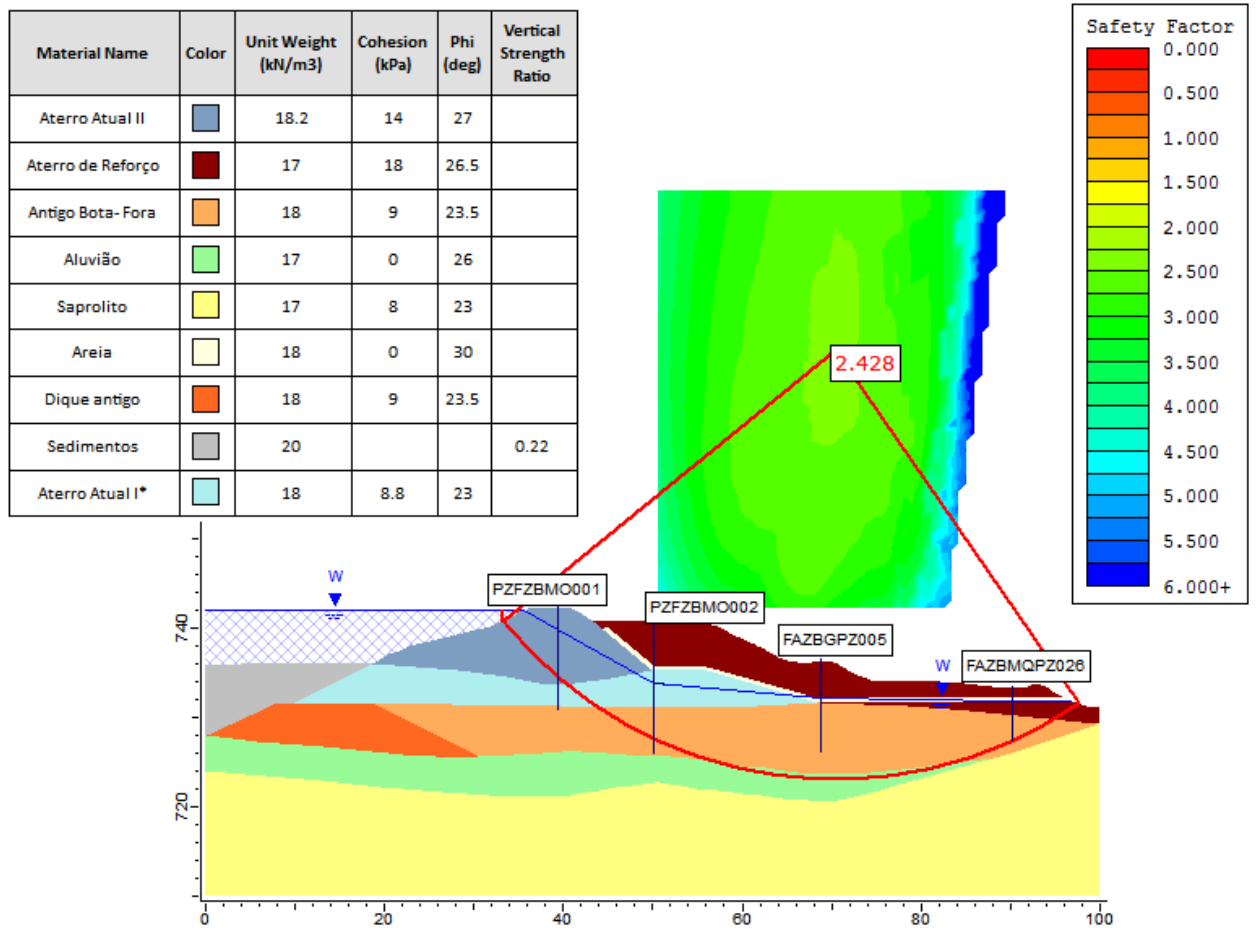


Figura 0.114 – Análise de Estabilidade – Variação da coesão do Aterro Atual I do cenário 1.

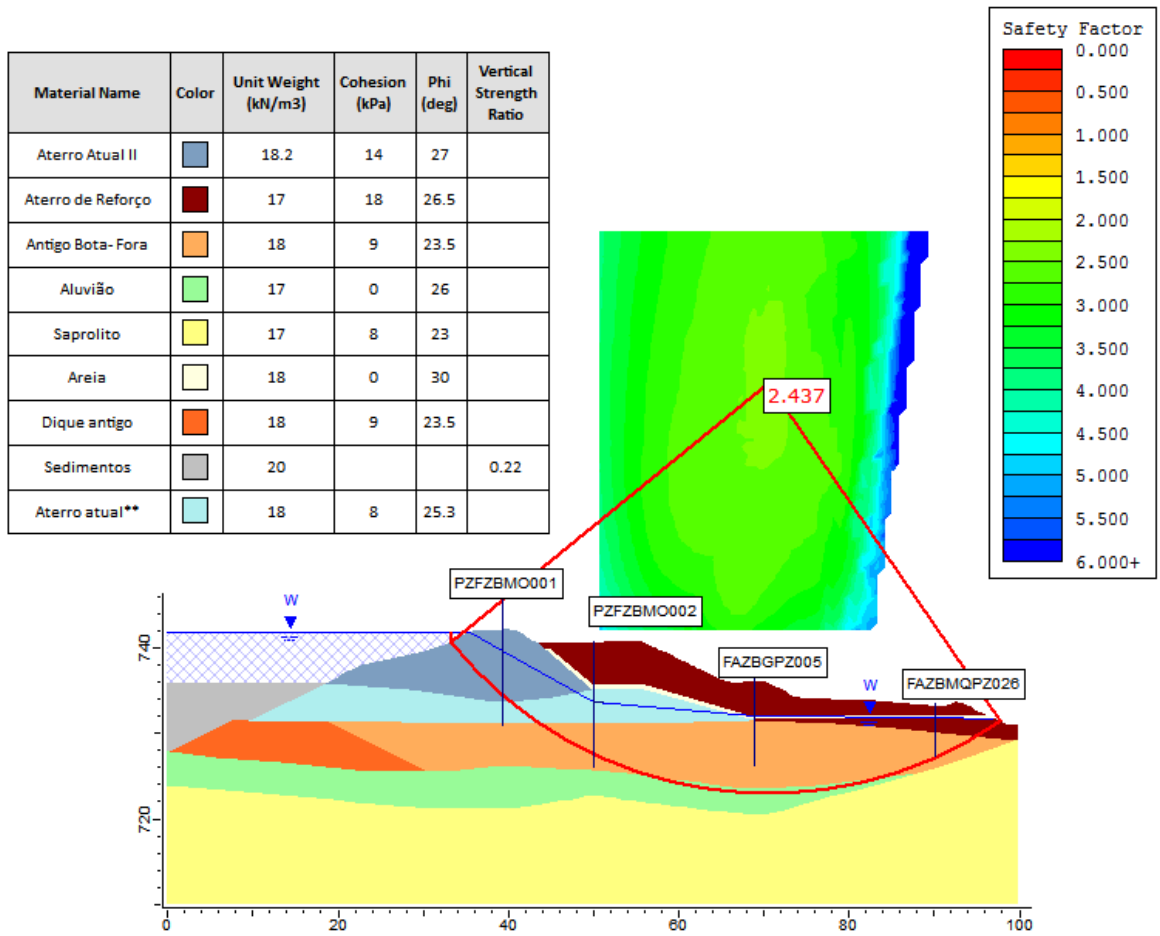


Figura 0.115 – Análise de Estabilidade – Variação do ângulo de atrito do Aterro Atual I do cenário 1.

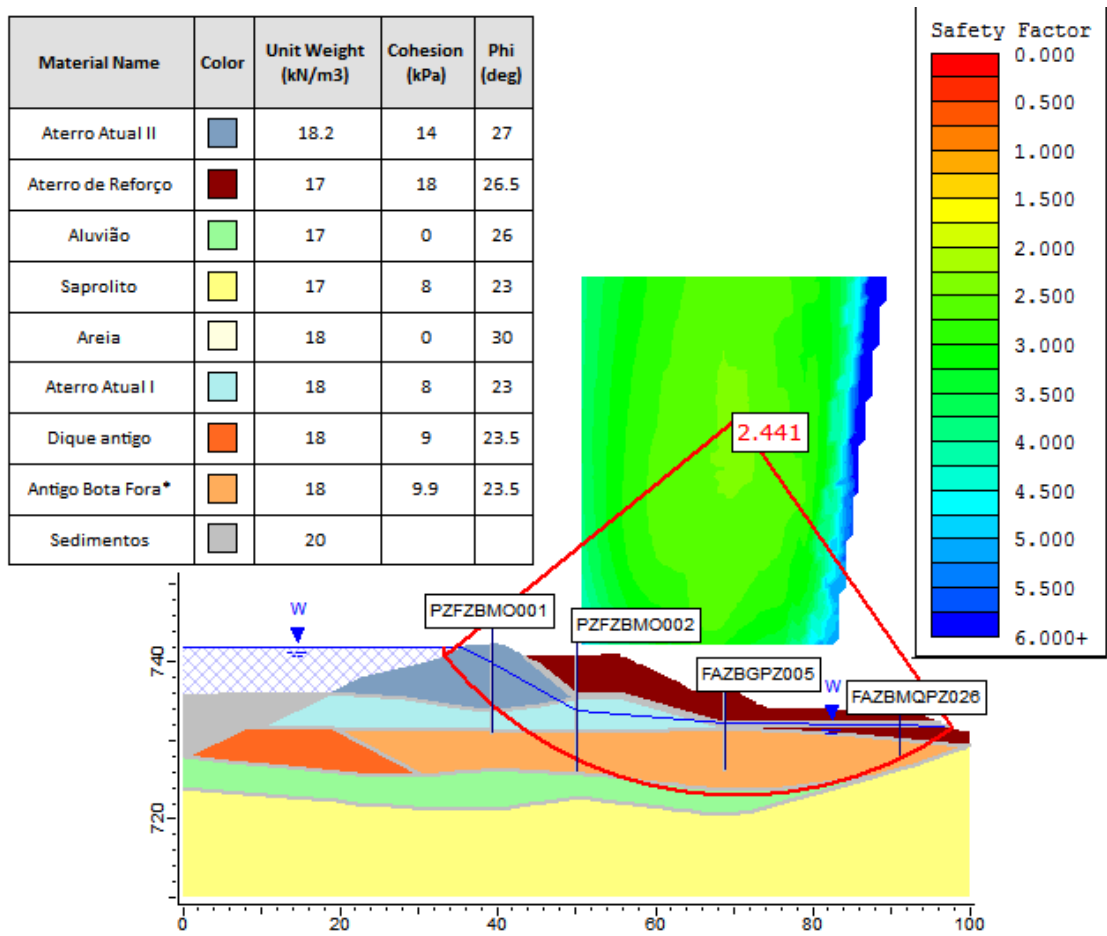


Figura 0.116 – Análise de Estabilidade – Variação da coesão do Antigo Bota- Fora do cenário 1.

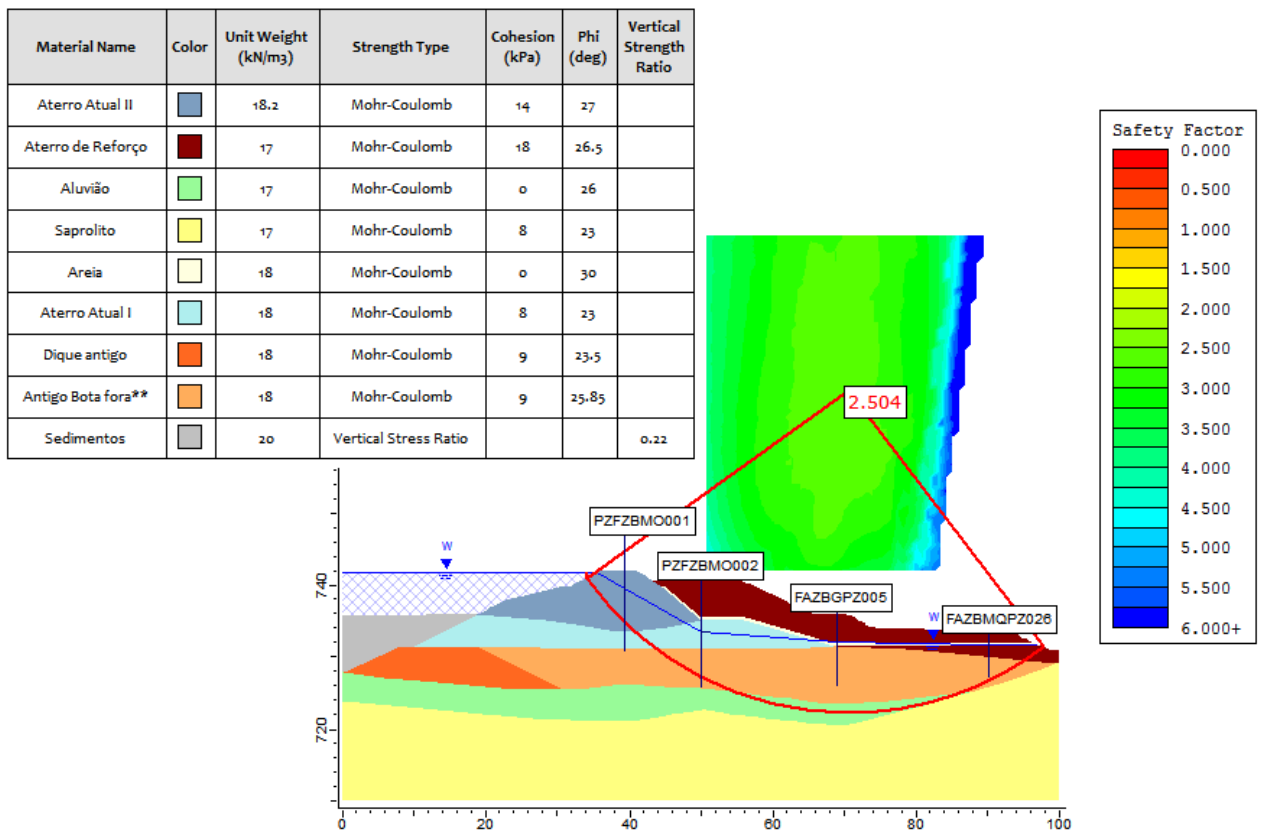


Figura 0.117 – Análise de Estabilidade – Variação Do ângulo de atrito do Antigo Bota- Fora do cenário 1.

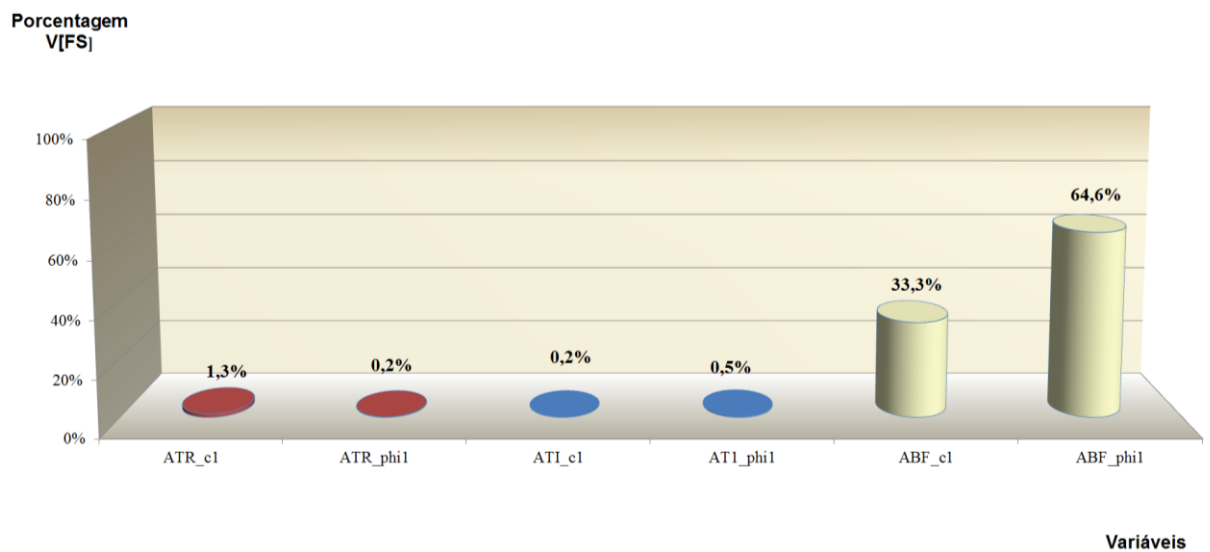


Figura 0.118 - Porcentagem de contribuição dos parâmetros na variância de FS – Cenário I.

Observa-se na Figura 0.118 que a contribuição na estabilidade da estrutura, no Cenário I, está sujeita à influência predominantemente pelos materiais do Antigo Bota –Fora. Nota-se que o parâmetro de resistência que mais contribuiu na variância do Fator de Segurança para este cenário foi o ângulo de atrito seguido da coesão contribuindo com 64,6% e 33,3% na estabilidade da estrutura, respectivamente. Nesse sentido, a **probabilidade de ruptura do cenário I por instabilização da barragem C pelo método de FOSM é igual a $1,0 \times 10^{-8}$** .

As análises de estabilidade, bem como os respectivos fatores de segurança obtidos, são apresentadas na Figura 0.119, Figura 0.120, Figura 0.121, Figura 0.122, Figura 0.123 e Figura 0.124 . Na Tabela 0.85 são apresentados os parâmetros de cada material utilizados nas análises. Na Figura 0.86 são apresentadas as contribuições de cada parâmetro e de cada material nas análises de estabilidade.

A seguir serão apresentadas as análises de estabilidades variando os parâmetros pela metodologia de FOSM, considerando o cenário 2.

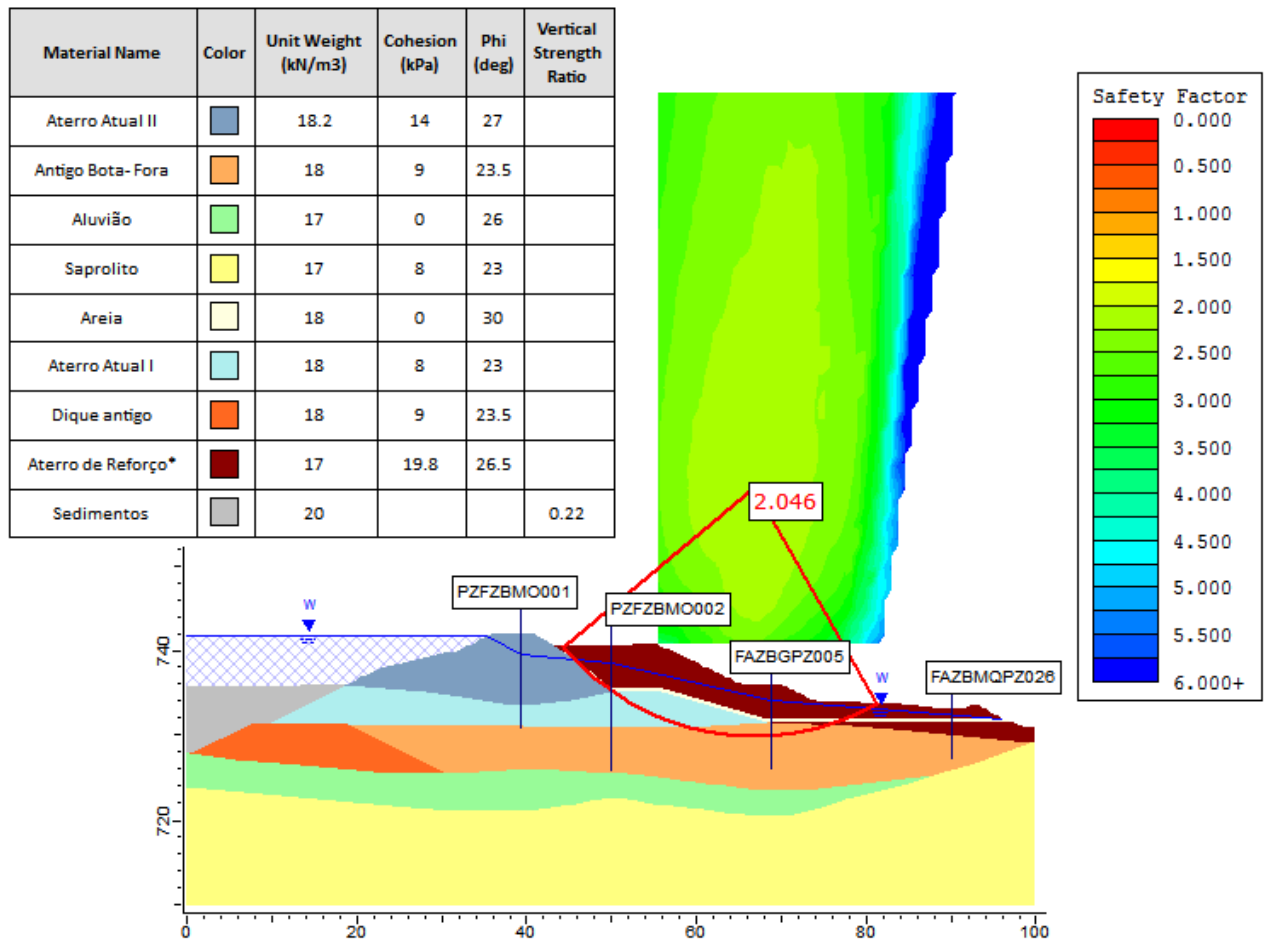


Figura 0.119 – Análise de Estabilidade – Variação da coesão do Aterro de Reforço do cenário 2.

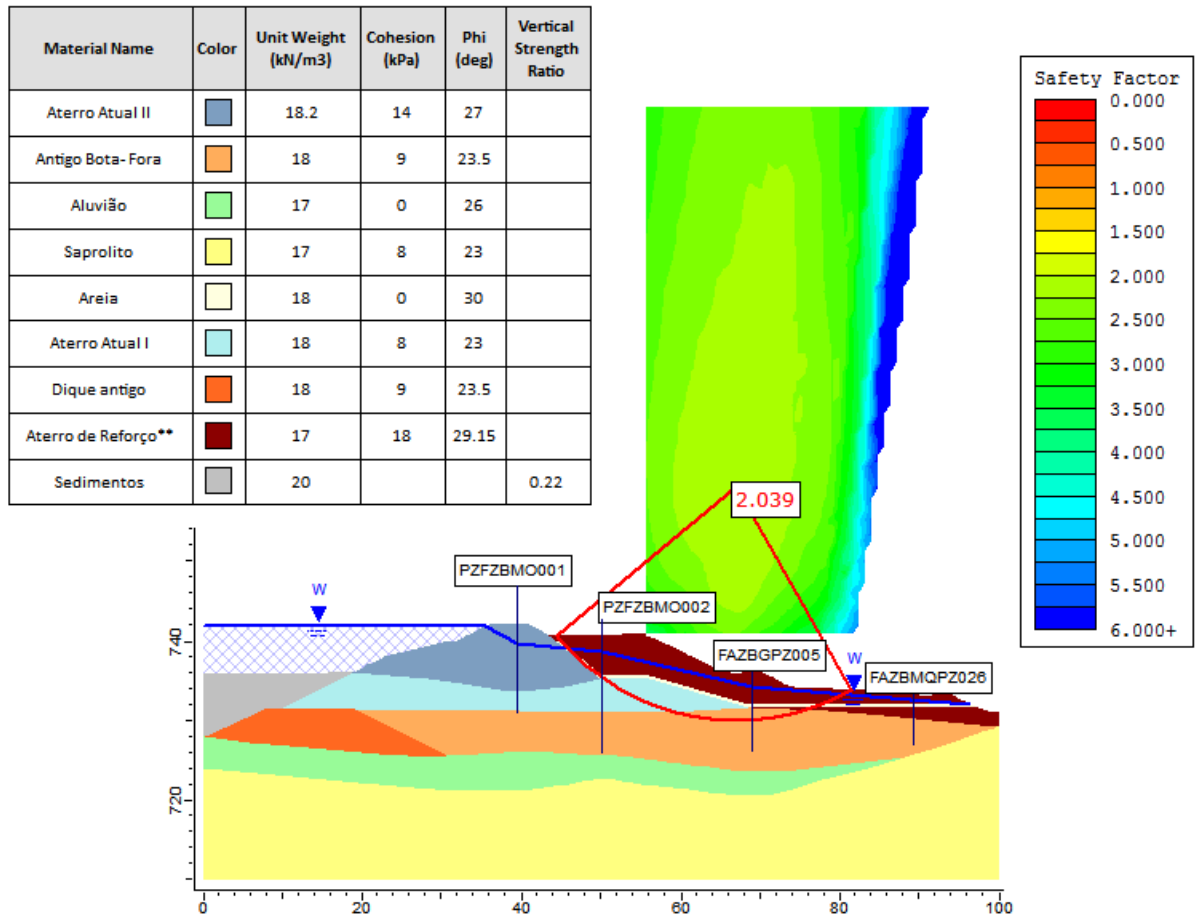


Figura 0.120 – Análise de Estabilidade – Variação do ângulo de atrito do Aterro de Reforço do cenário 2.

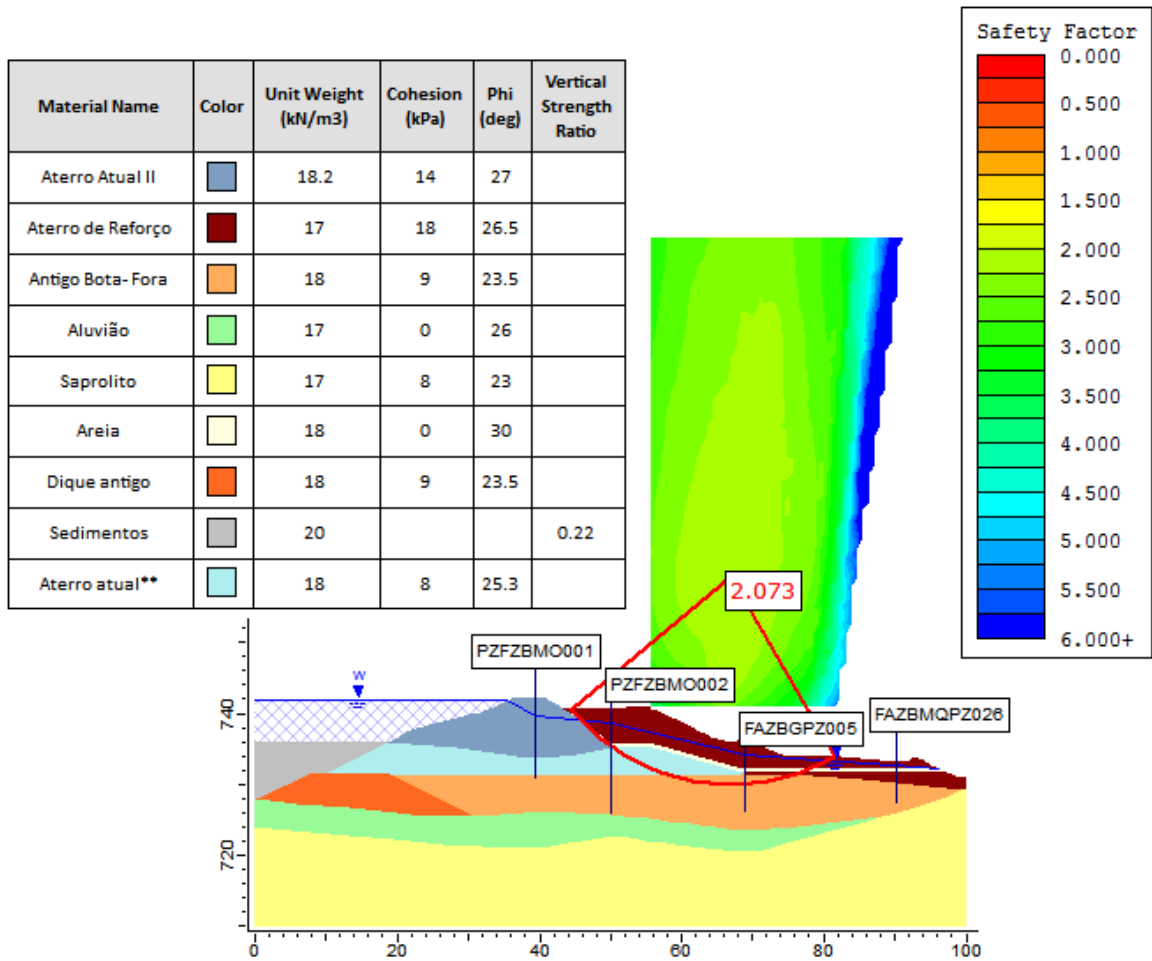


Figura 0.121 – Análise de Estabilidade – Variação do ângulo de atrito do Aterro Atual I do cenário 2.

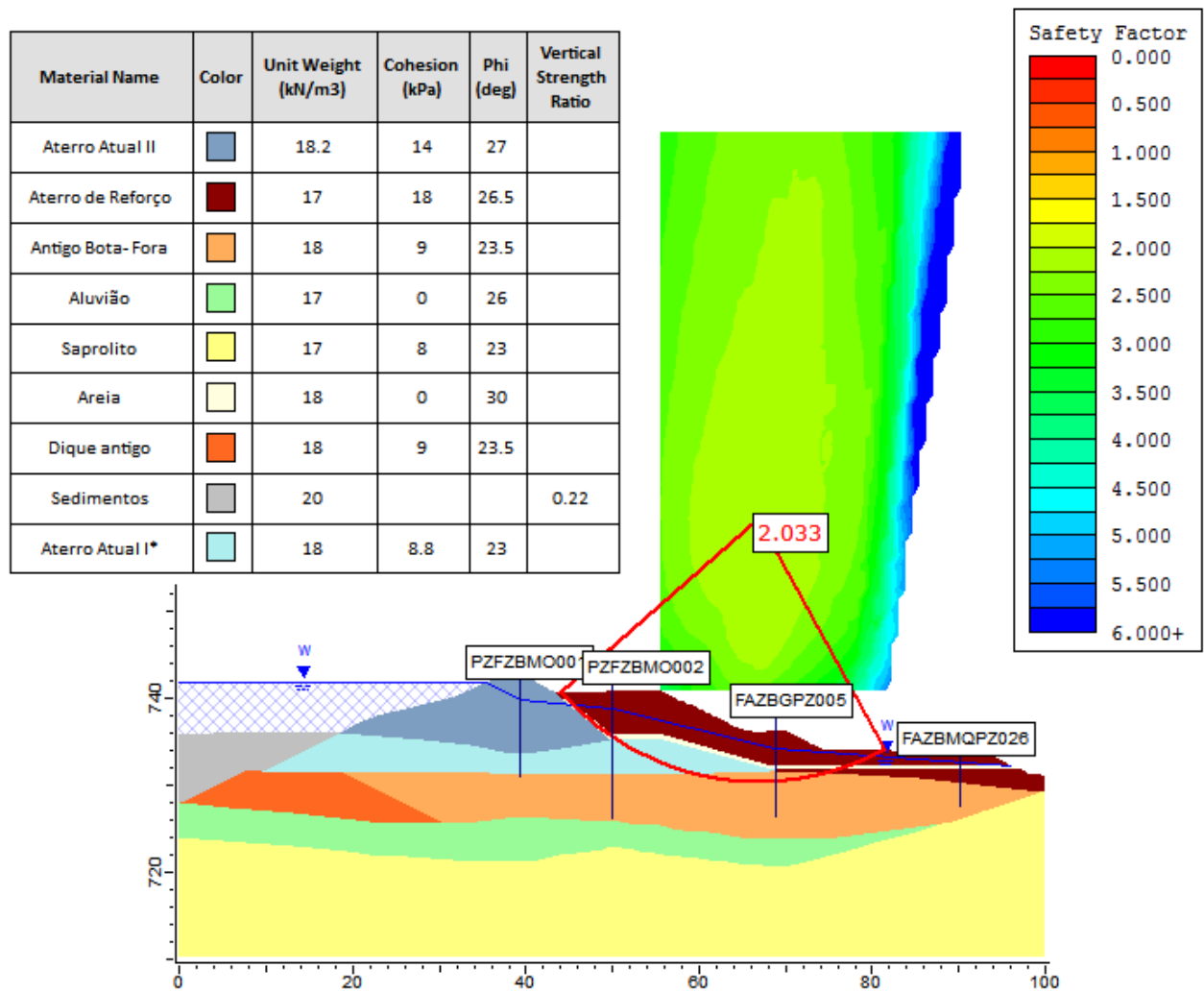


Figura 0.122 – Análise de Estabilidade – Variação da coesão do Aterro Atual I do cenário 2.

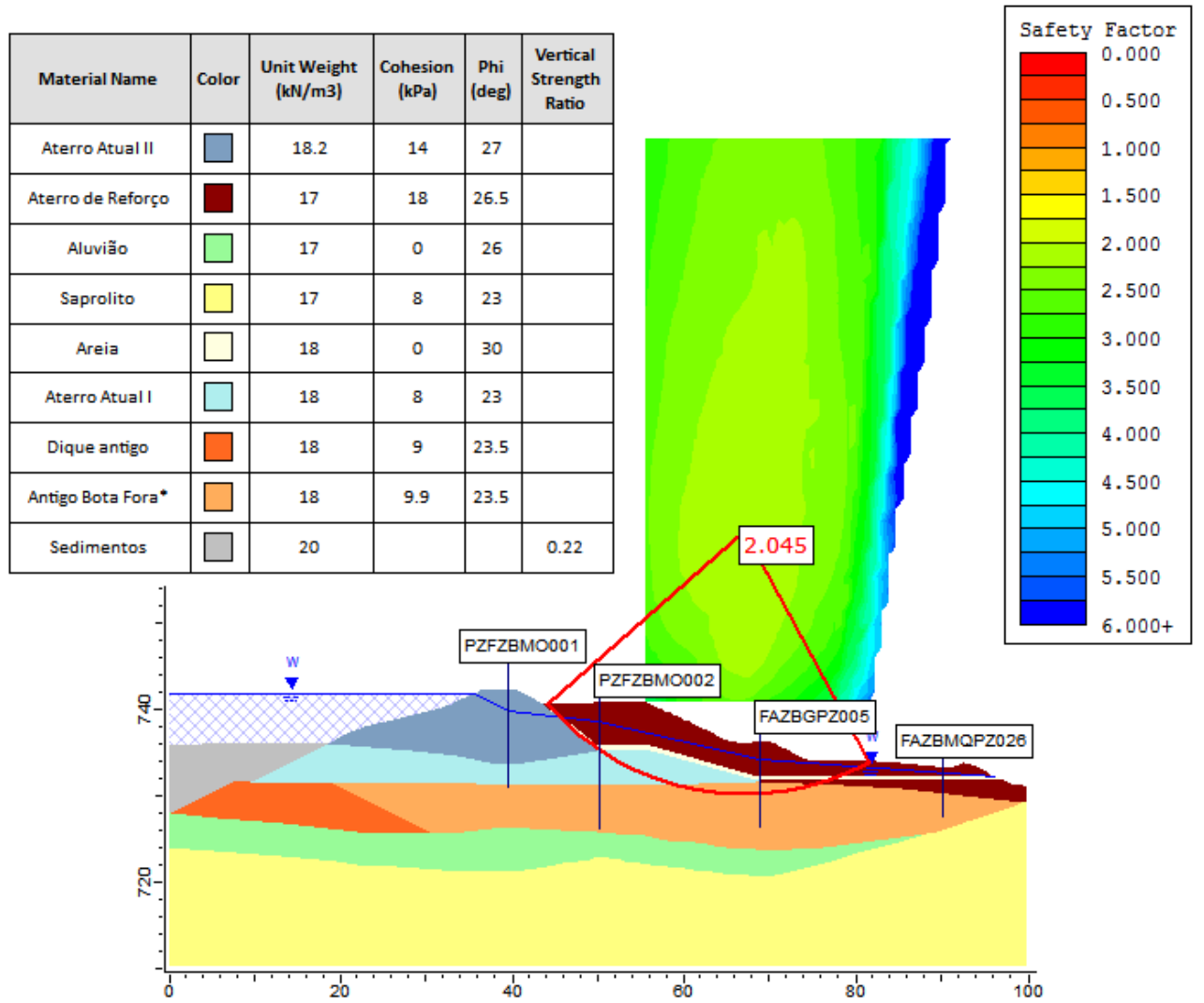


Figura 0.123 – Análise de Estabilidade – Variação da coesão do Antigo Bota- Fora do cenário 2.

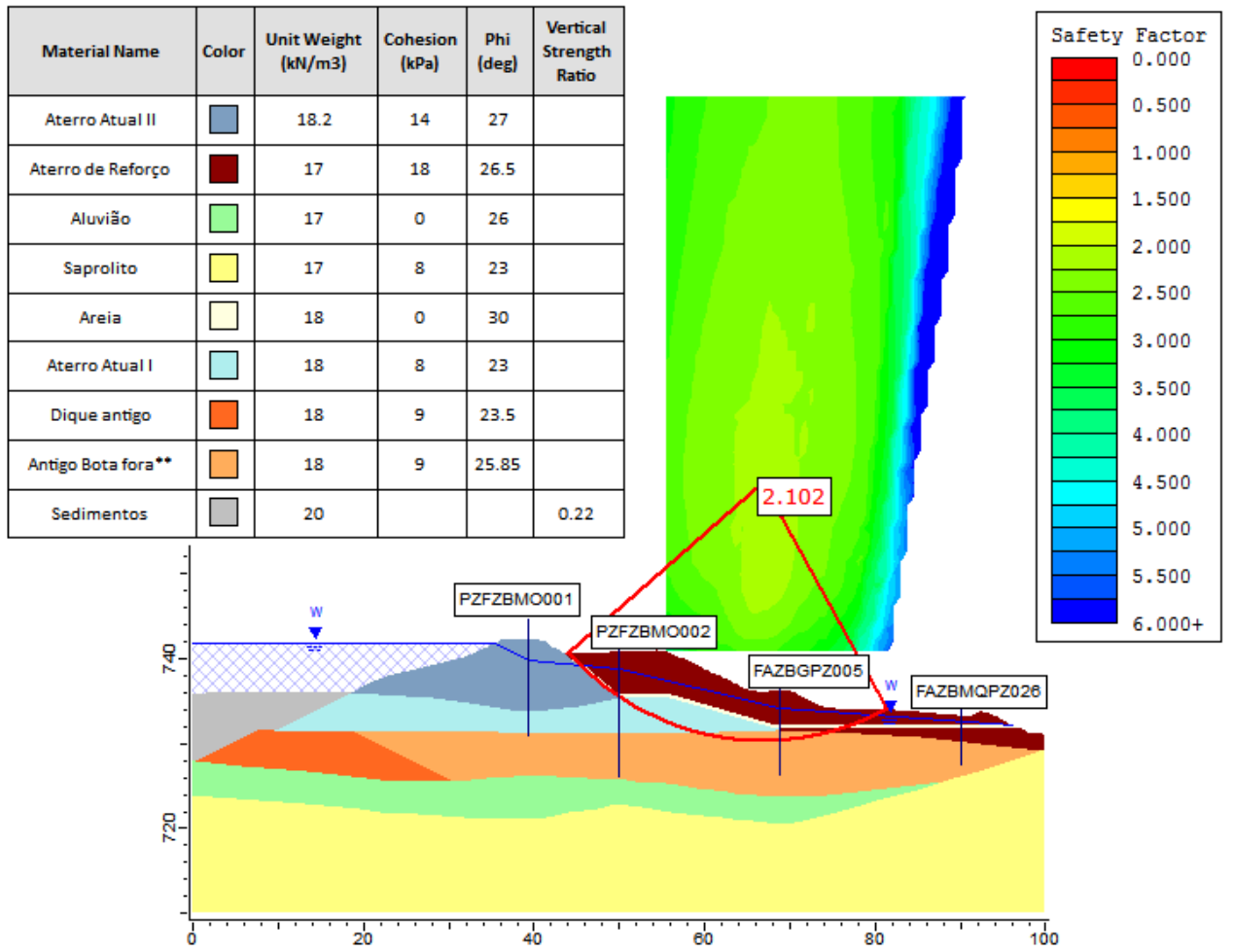


Figura 0.124 – Análise de Estabilidade – Variação Do ângulo de atrito do Antigo Bota- Fora do cenário 2.

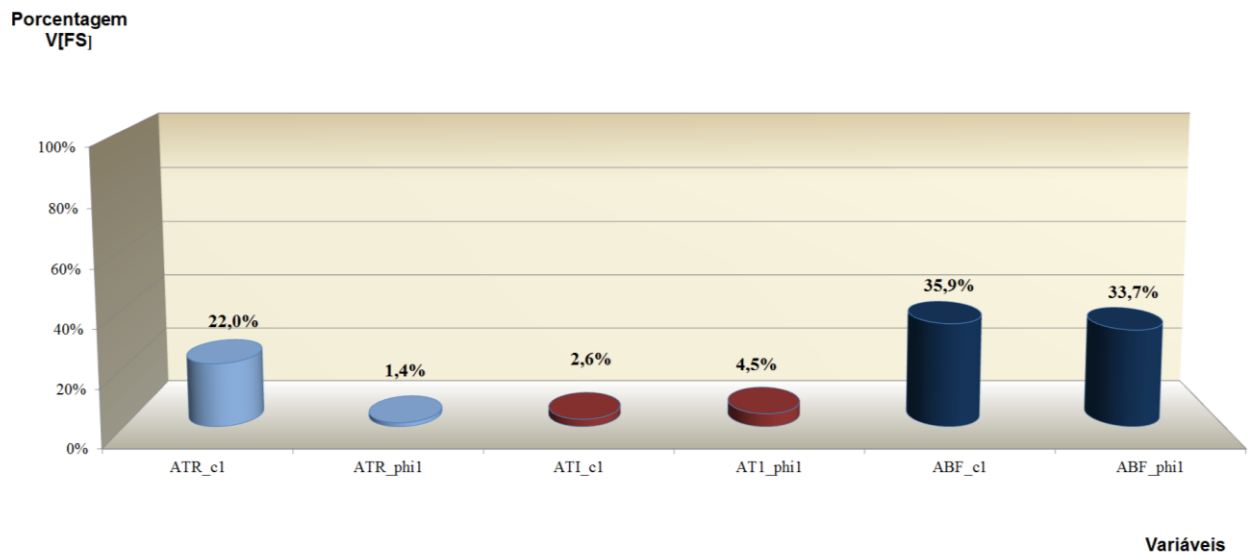


Figura 0.125 - Porcentagem de contribuição dos parâmetros na variância de FS – Cenário 2.

Para o cenário 2, a cunha de ruptura transpassa os materiais de Aterro de Reforço, Aterro Atual I e Antigo bota fora. Como demonstrado na Figura 0.125, os parâmetros de resistência do Antigo Bota- Fora contribuem de forma preponderante para a estabilidade do maciço, correspondendo a 69,6%, sendo seguido pelos parâmetros de resistência do Aterro de Reforço contribuindo com 23,4%. Nesse sentido, a probabilidade de ruptura do cenário 2 por instabilização da barragem C pelo método de FOSM é igual a $1,0 \times 10^{-8}$.

○ MÉTODO DE MONTE CARLO

Para as simulações aqui apresentadas, o programa Slide® utilizou o gerador de números aleatórios “Parker & Miller v.3” e calculou uma nova superfície de ruptura global para cada nova simulação. Foram realizadas 100.000 simulações, cuja convergência pode ser avaliada pelas Figura 0.126 (cenário 1) e Figura 0.130 (cenário 2), habilitando o procedimento Overall Slope, visando obter maior número de fatores de segurança calculados e determinar uma distribuição com boa aderência às amostras.

Consideraram-se como variáveis aleatórias os parâmetros apresentados na Tabela 0.85, com seus respectivos valores médios, desvios-padrão e tipo de distribuição de probabilidades. Para os parâmetros com distribuição Normal e Log-Normal, foram considerados como limites inferior e superior os valores referentes à distância de 2 vezes o desvio-padrão ao redor da média (Intervalo de Confiança que compreende 95,5% dos dados).

Os valores médios, desvios-padrão e respectivos limites inferior e superior dos parâmetros considerados para cada material estão apresentados na Tabela 0.85. Buscou-se obedecer à representatividade física para os limites inferior e superior dos parâmetros.

Tabela 0.85 – Média, desvio-padrão e limites inferior e superior considerados.

| COESÃO EFETIVA | | | | | | |
|---------------------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Material | μ | σ | Mínimo Relativo | Máximo Relativo | Valor Absoluto Mínimo | Valor Absoluto Máximo |
| Aterro Atual I | 8 | 2,2 | 3,5 | 4,5 | 5 | 12 |
| Aterro Atual II | 14 | 1,7 | 3,4 | 3,4 | 11 | 17 |
| Aterro de Reforço | 18 | 6,6 | 13,2 | 13,2 | 5 | 31 |
| Dique Antigo | 9 | 4,4 | 4 | 8,7 | 5 | 18 |
| Antigo Bota Fora | 9 | 4,4 | 4 | 8,7 | 5 | 18 |
| Aluvião | 0 | - | - | - | - | - |
| ÂNGULO DE ATRITO EFETIVO | | | | | | |
| Material | μ | σ | Mínimo | Máximo | Valor Absoluto Mínimo | Valor Absoluto Máximo |
| | | | Relativo | Relativo | | |
| Aterro Atual I | 23 | 1,8 | 3,5 | 3,5 | 20 | 26 |
| Aterro Atual II | 27 | 0,8 | 1,6 | 1,6 | 25 | 29 |
| Aterro de Reforço | 26,5 | 3,4 | 6,9 | 3,9 | 20 | 30 |
| Dique Antigo | 23,5 | 3,2 | 6,4 | 6,4 | 17 | 30 |
| Antigo Bota Fora | 23,5 | 3,2 | 6,4 | 6,4 | 17 | 30 |
| Aluvião | 26 | 2,7 | 5,5 | 5,5 | 21 | 31 |

Os resultados das simulações de Monte Carlo realizadas para o cenário I (Condição Normal de Operação) são apresentados Figura 0.126.

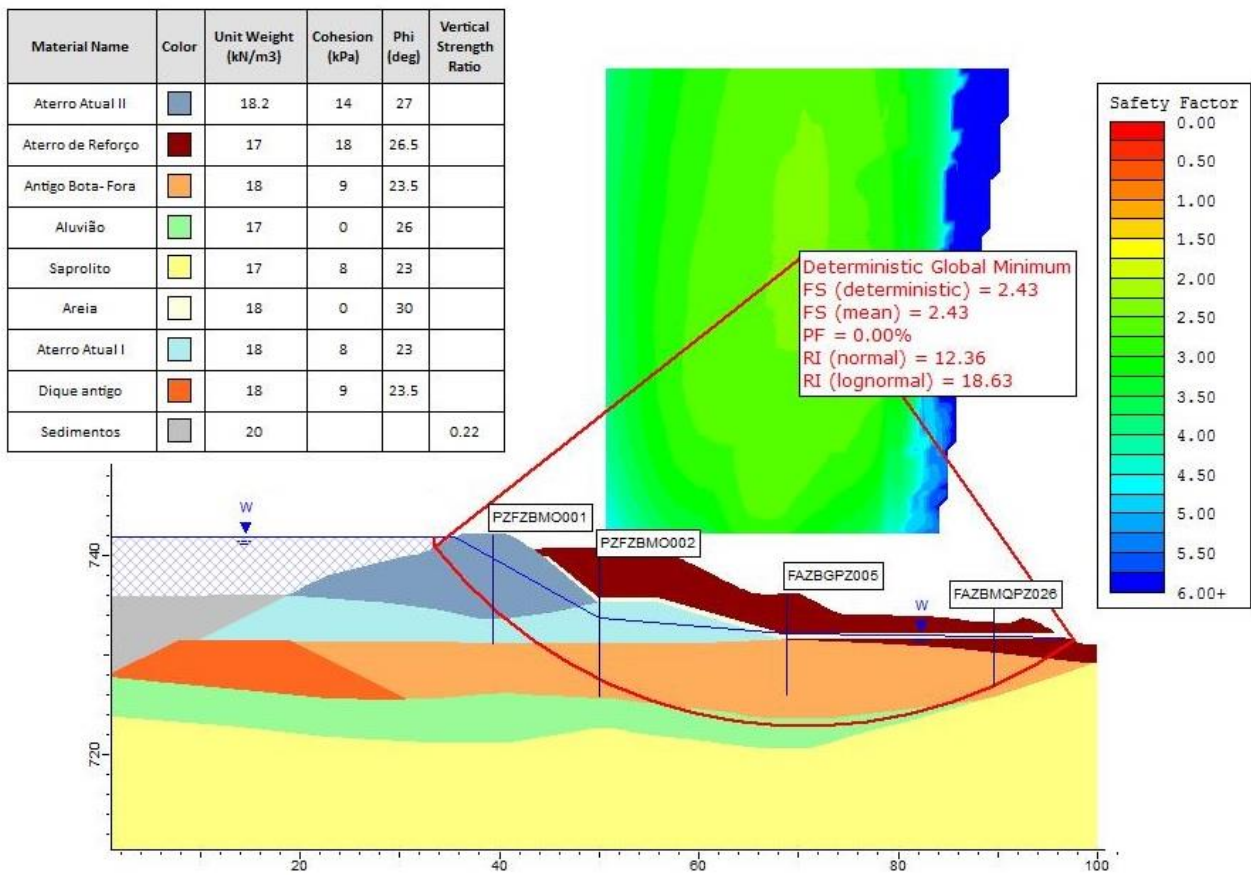


Figura 0.126 - Resultados das simulações de Monte Carlo – Cenário 1.

As análises foram realizadas no Slide 7.0, e os resultados por meio de gráficos estão apresentados na Figura 0.127, Figura 0.128 e Figura 0.129.

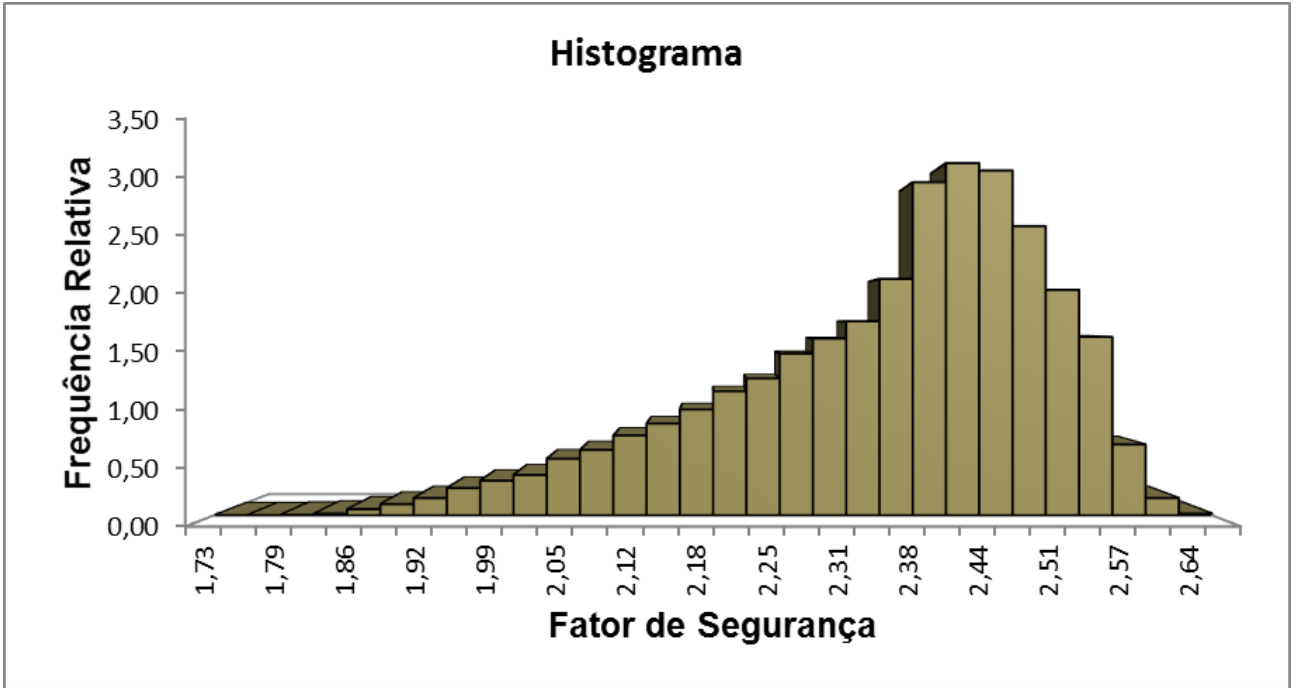


Figura 0.127 – Histograma dos Fatores de Segurança – Cenário 1.

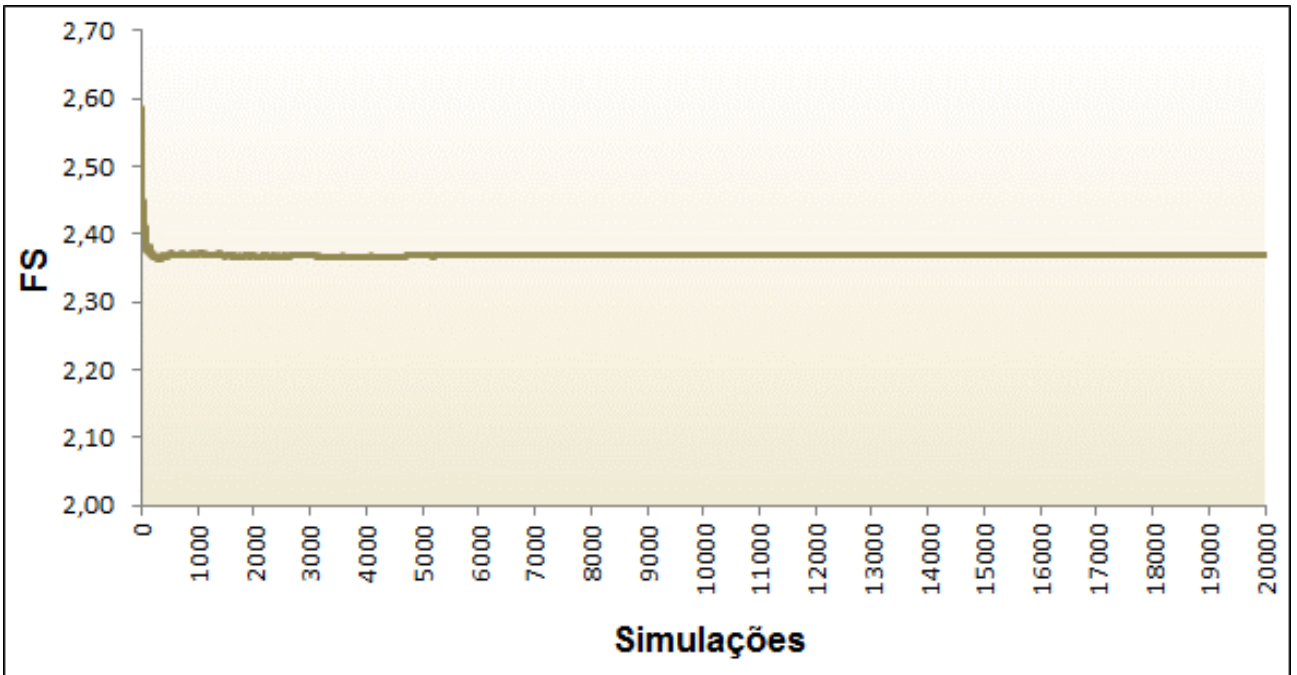


Figura 0.128 – Distribuição dos Fatores de Segurança em relação ao número de análises – Cenário 1.

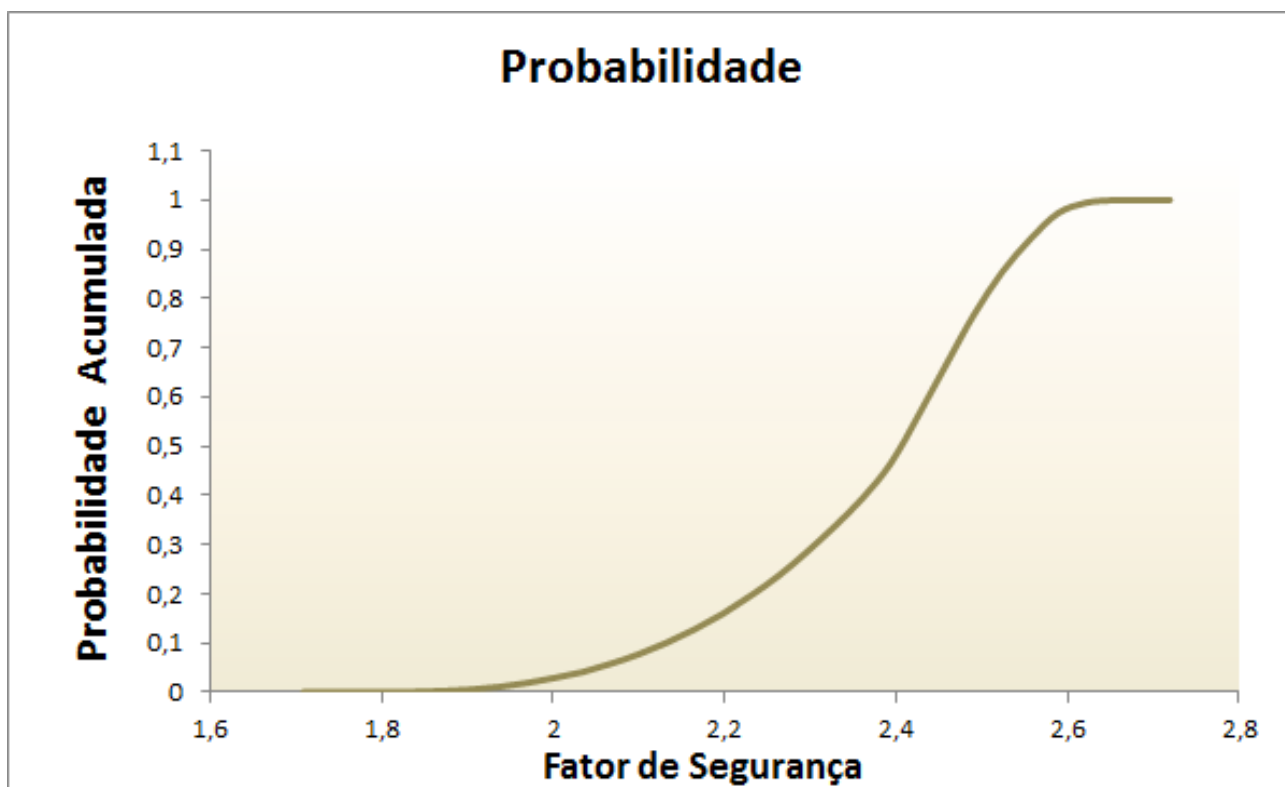


Figura 0.129 – Probabilidade dos Fatores de Segurança – Cenário 1.

Nota-se que nenhuma simulação resultou em $FS < 1$, ou seja, a probabilidade de ruptura obtida é igual à zero (número de rupturas dividido pelo número de simulações). Isto é um indicativo de que o valor da probabilidade “real” de ruptura é muito reduzido (menor que 10^{-8}).

Tabela 0.86 - Parâmetros utilizados e resultados das análises de estabilidade.

| MATERIAL | PARÂMETRO | PARAMETRO | F.S | dX_i | dFS_i | dFS_i/dX_i | $V[X_i]$ | $(dFS_i/dX_i)^2$ $\times V[X_i]$ | CONTRIBUIÇÃO |
|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------|--------|---------|--------------|----------|-------------------------------------|--------------|
| | ANALISADO | UTILIZADO | | | | | | | |
| Aterro Reforço | Coesão | $\gamma = 17,0$ KN/m ³ | 2,05 | 1,8 | -0,02 | -0,0133 | 43,56 | 0,0077 | 22,00% |
| | efetiva | $c' =$ 19,80KN/m ² | | | | | | | |
| | | $\phi' = 26,50^\circ$ | | | | | | | |
| | Ângulo de | $\gamma = 17,0$ KN/m ³ | 2,04 | 2,65 | -0,02 | -0,0064 | 11,56 | 0,0005 | 1,40% |
| | atrito efetivo | $c' = 18,00$ kPa | | | | | | | |
| | | $\phi' = 29,15^\circ$ | | | | | | | |
| Aterro Atual I | Coesão | $\gamma = 18,2$ KN/m ³ | 2,03 | 0,8 | -0,01 | -0,0138 | 4,84 | 0,0009 | 2,60% |
| | efetiva | $c' = 8,80$ kPa | | | | | | | |
| | | $\phi' = 23,00^\circ$ | | | | | | | |
| | Ângulo de | $\gamma = 18,2$ KN/m ³ | 2,07 | 2,3 | -0,05 | -0,0222 | 3,24 | 0,0016 | 4,50% |
| | atrito efetivo | $c' = 8,00$ kPa | | | | | | | |
| | | $\phi' = 25,30^\circ$ | | | | | | | |
| Antigo Bota- Fora | Coesão | $\gamma = 18,0$ KN/m ³ | 2,05 | 0,9 | -0,02 | -0,0256 | 19,36 | 0,0126 | 35,90% |
| | efetiva | $c' = 9,90$ kPa | | | | | | | |
| | | $\phi' = 23,50^\circ$ | | | | | | | |
| | Ângulo de | $\gamma = 18,0$ KN/m ³ | 2,1 | 2,35 | -0,08 | -0,034 | 10,24 | 0,0119 | 33,68% |
| | atrito efetivo | $c' = 9,00$ kPa | | | | | | | |
| | | $\phi' = 25,85^\circ$ | | | | | | | |
| | $\gamma = 18,0$ KN/m ³ | | | | | | | | |

- Análise Probabilística Monte Carlo – Cenário 2 – Nível Crítico

Os resultados das simulações de Monte Carlo realizadas para o Cenário 2 (Nível Crítico) são apresentados na Figura 0.130.

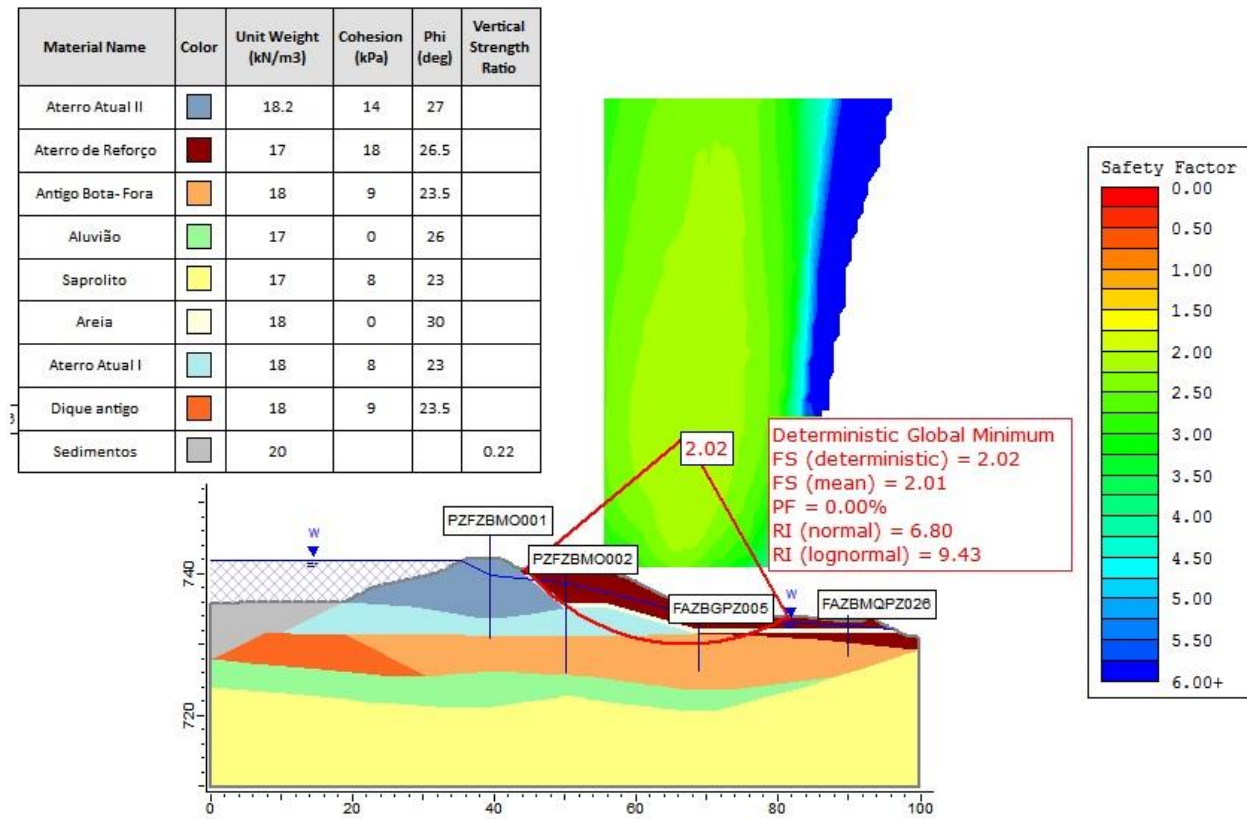


Figura 0.130 - Resultados das simulações de Monte Carlo – Cenário 2.

As análises foram realizadas no Slide 5.0, e os resultados por meio de gráficos estão apresentados nas Figura 0.131, Figura 0.132 e Figura 0.133.

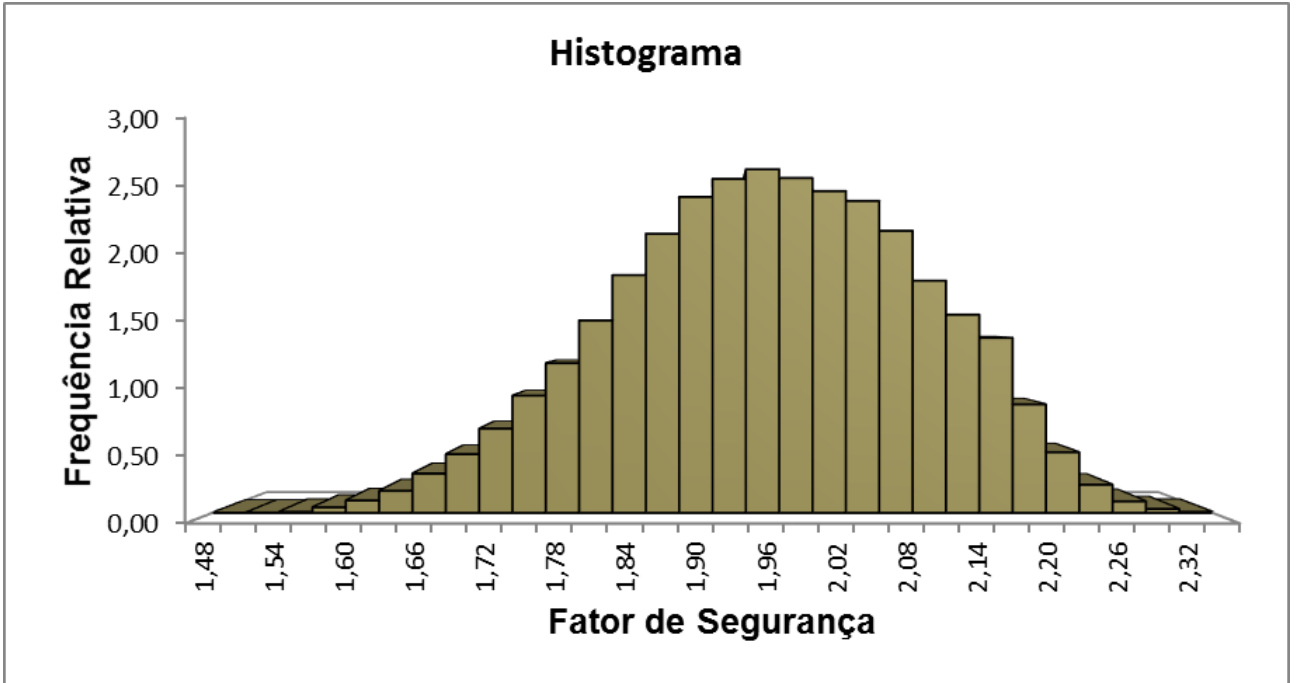


Figura 0.131 – Histograma dos Fatores de Segurança – Cenário 2.

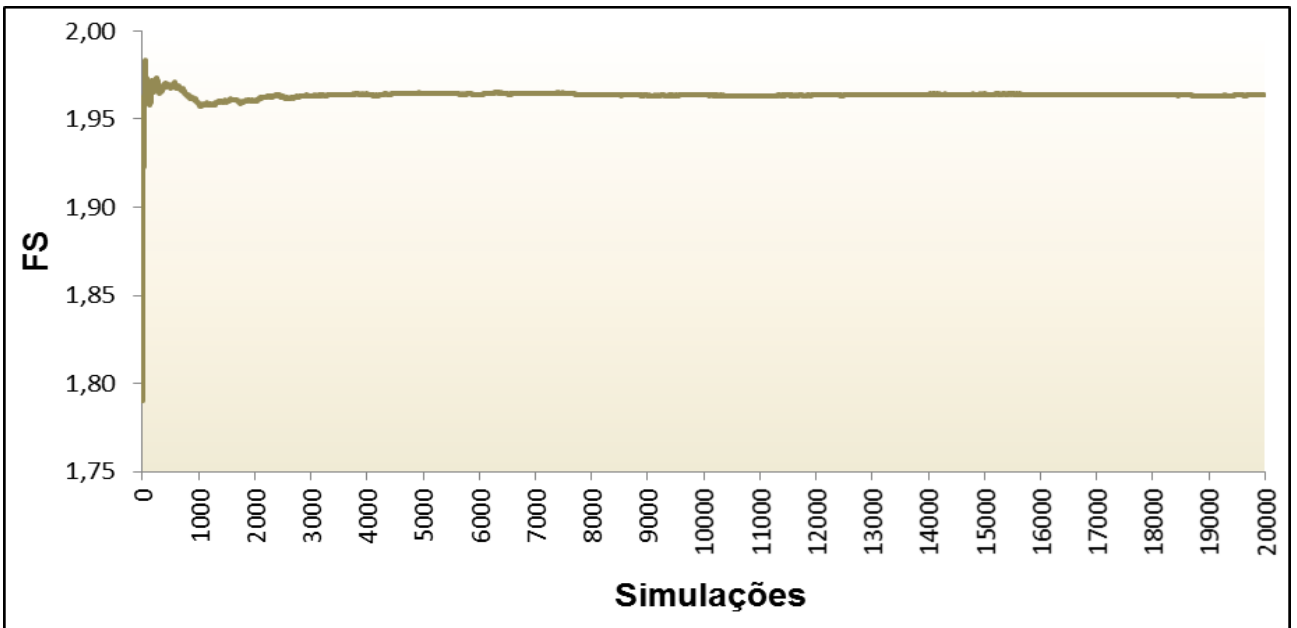


Figura 0.132 – Distribuição dos Fatores de Segurança em relação ao número de análises – Cenário 2.

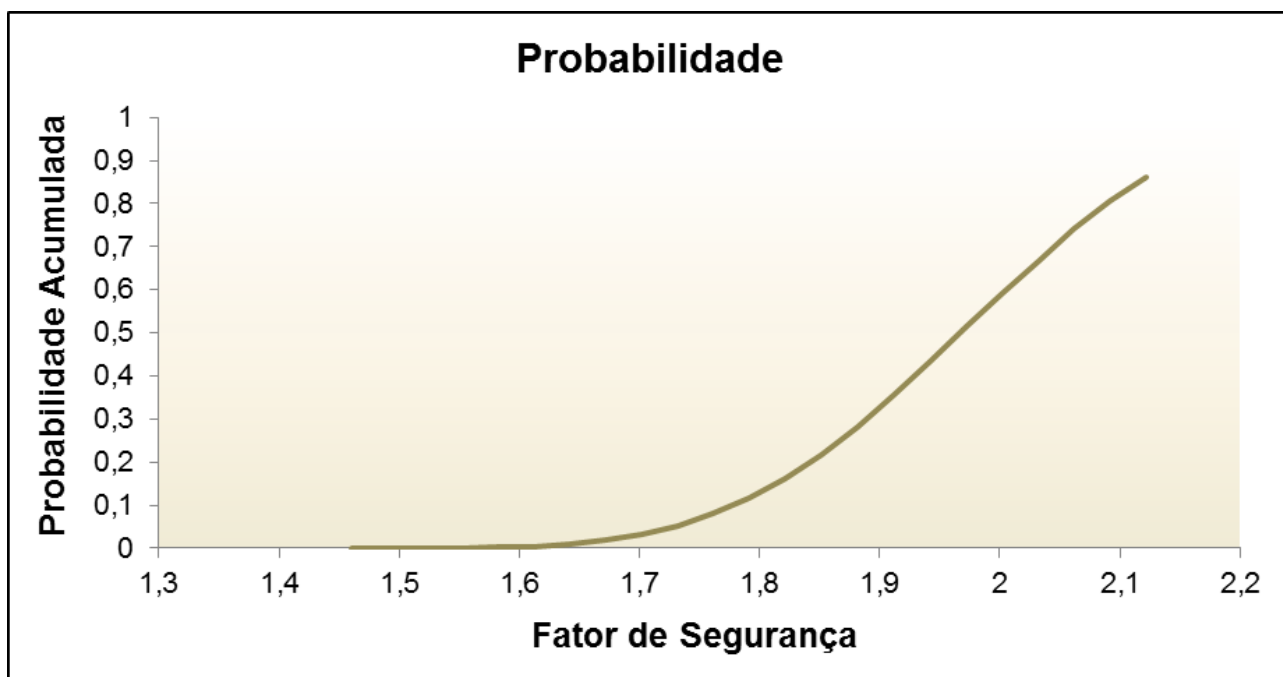


Figura 0.133 – Probabilidade dos Fatores de Segurança – Cenário 2.

Assim como no Cenário I, nota-se que no Cenário II nenhuma simulação resultou em $FS < 1$, ou seja, a probabilidade de ruptura (número de rupturas dividido pelo número de simulações) obtida é igual a zero. Isto é um indicativo de que o valor da probabilidade “real” de ruptura é muito reduzido (menor que 10^{-8}).

- Resultados probabilísticos

Assim como no cenário 1, nota-se que, no Cenário 2, nenhuma simulação resultou em $FS < 1$, ou seja, a probabilidade de ruptura obtida é igual a zero (número de rupturas dividido pelo número de simulações). Isto é um indicativo de que o valor da probabilidade “real” de ruptura é muito reduzido (menor que 10^{-8}).

A Tabela 0.87 a seguir sintetiza as probabilidades de todos os cenários considerados para ocorrência de ruptura por instabilização.

Tabela 0.87 - Probabilidades de ocorrência de ruptura por instabilização.

| Cenário | Método de Ruptura | Probabilidade de Ruptura |
|---------|-------------------|--------------------------|
| 1 | Fosm | $1,0 \times 10^{-8}$ |
| | Monte Carlo | $1,0 \times 10^{-8}$ |
| 2 | Fosm | $1,0 \times 10^{-8}$ |
| | Monte Carlo | $1,0 \times 10^{-8}$ |

Para o cenário 1, a probabilidade de ruptura por instabilização da barragem A é igual a $1,0 \times 10^{-8}$.

Para o cenário 2, a probabilidade de ruptura por instabilização da barragem A é igual a $1,0 \times 10^{-8}$.

- MODO DE FALHA EROSÃO INTERNA

Neste capítulo são apresentadas as estimativas de probabilidade de ruptura da Barragem C associada à erosão interna.

A metodologia definida para a análise probabilística da ruptura da Barragem A associada à erosão interna foi a combinação de Árvore de Eventos (ETA) e Árvore de Falhas (FTA).

A Figura 0.134 apresenta a árvore de eventos elaborada para o cálculo da probabilidade de ruptura da estrutura por erosão interna pelo maciço em função da concentração de fluxo ao longo de condutos enterrados com probabilidade de ruptura de 3×10^{-5} .

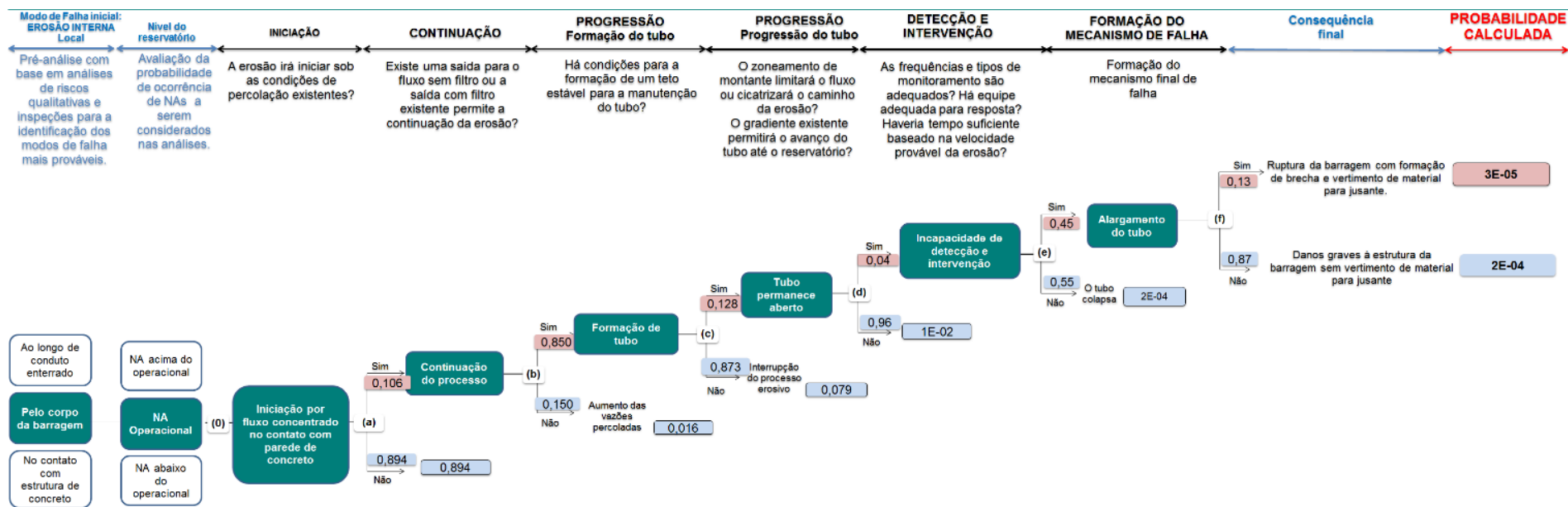


Figura 0.134 – Árvore de eventos – Erosão Interna pelo macio Barragem C.

- Nó (0) – Nível do reservatório

Neste nó, analisa-se para qual nível do reservatório o processo de erosão interna é possível.

Considera-se que a erosão regressiva pelo maciço ao longo da galeria enterrada pode ter início com o reservatório no nível d'água operacional (N.A. na El.738,55 m). Desta forma, para este nó foi atribuída à probabilidade $P = 1$.

- Nó (a) – Início do processo erosivo

O evento iniciador do processo de erosão interna analisado corresponde à erosão por fluxo concentrado no contato com paredes de concreto.

Nesta árvore de falha são consideradas as características construtivas do contato da parede com o maciço. A probabilidade de ocorrência deste nó da árvore de eventos foi estimada a partir da árvore de falhas 1 apresentada na Figura 0.135 e das considerações apresentadas nas Tabela 0.88 e Tabela 0.89.

$$a = 0,106 (= a_{111} \times a_{222})$$

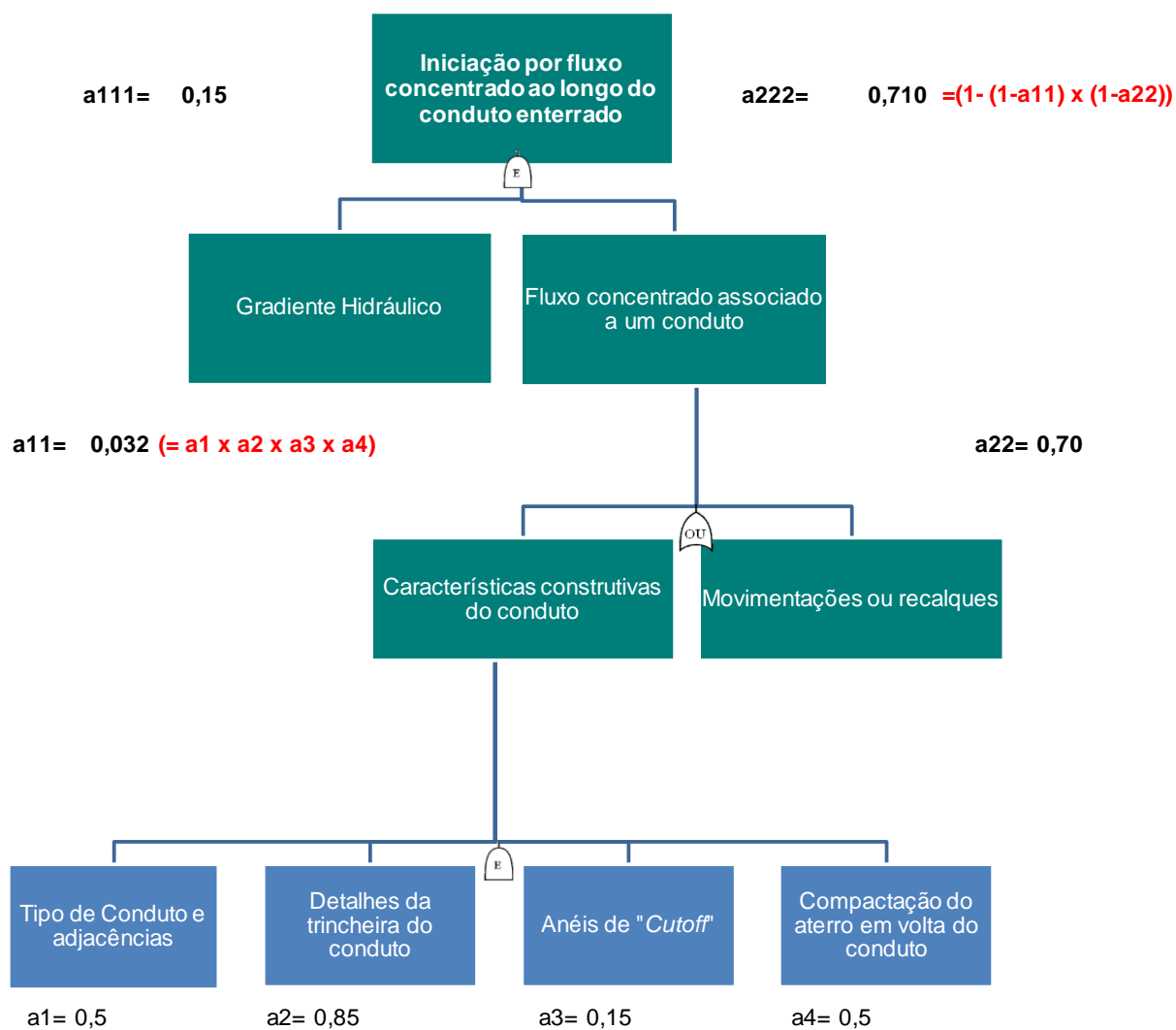


Figura 0.135 - Árvore de falhas 1 para o nó (a) da árvore de eventos .

Tabela 0.88 - Fatores de Influência na Probabilidade de Iniciação de Erosão Interna-Gradiente Hidráulico.

| Fator de influência | Virtualmente certo | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|----------------------|-------------------------------|---------------|--------|----------------|--|
| Gradiente Hidráulico | Presença de surgência de água | Alto | Médio | Baixo | Conforme estudo apresentado no apêndice H. |

Tabela 0.89 - Fatores de Influência na Probabilidade de Ocorrência de Fluxo Concentrado Associado a um Conduto (modificado de Fell et. al, 2004 apud Fell & Fry, 2007).

| Fator de influência | Mais provável | Bastante provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|-----------------------------------|---|--|---|--|--|
| Tipo de conduto e adjacências | Qualquer conduto circular, não envelopado com concreto | Conduto de pedra, tijolo, metal corrugado | Conduto circular envelopado com concreto, concreto pré-moldado ou moldado <i>in loco</i> , paredes laterais verticais | Conduto circular envelopado com concreto, concreto pré-moldado ou moldado <i>in loco</i> , laterais inclinadas (com trincheira larga para compactação) | O vertedouro operacional da barragem possui dimensões 2,60x1,60x0,30, em metros, que descarrega em um bueiro em seção retangular. |
| Detalhes da trincheira do conduto | Estreita, profunda, laterais quase verticais em solo ou rocha, preenchida com solo | Largura, profundidade e inclinação das laterais com dimensões médias | Larga, inclinação mais suave que 1H:1V, largura da base superior à do conduto mais 2m para cada lado | Trincheira totalmente em rocha não erodível, preenchida até a superfície com concreto | Galeria de concreto com laterais verticais. |
| Anéis de <i>cutoff</i> | Anéis de <i>cutoff</i> mal detalhados, pouco espaçados | Anéis de <i>cutoff</i> | Anéis de <i>cutoff</i> bem detalhados, modelo USBR | Sem anéis de <i>cutoff</i> | Sem anéis de <i>cutoff</i> |
| Compactação em volta do conduto | Sem compactação especial adjacente ao conduto | - | Compactação normal | Compactação cuidadosa adjacente ao conduto | A seção típica é constituída de solo impermeável compactado, sem maiores detalhes quanto a compactação ao seu redor. |
| Movimentações ou recalques | Recalques significativos ou presença de solos de fundação altamente compressíveis. Junção com <i>shaft</i> dentro do maciço | Fundação em solo compressível espesso, grandes recalques calculados | - | Fundação em solo compressível pouco profundo, pequenos recalques calculados | Aterro apoiado sobre dique antigo e aluvião, estes são descritos como silto argiloso e areno siltoso, respectivamente. Observou-se a presença eventual de material orgânico. A espessura do aluvião e dique antigo variam de 7 a 10 metros, respectivamente. A Barragem foi implanta na década de 80, não apresentou recalques expressivos e encontra-se estabilizada. |

Nota 1: Caso <93% do grau de compactação normal, ramo seco da umidade, muito mais provável.

Nota 2: d15c = diâmetro da partícula da fração grossa da curva granulométrica para a qual 15% das partículas teriam diâmetro inferior; d15f = diâmetro da partícula da fração fina da curva granulométrica para a qual 15% das partículas teriam diâmetro inferior.

- Nó (b) – Continuação do processo erosivo

O nó (b) avalia se no ponto de saída da percolação existe algum tipo de sistema ou filtro capaz de impedir a evolução do processo de erosão.

Segundo Von Thun (1996) apud Fell et. al. (2005), o requisito necessário para a ocorrência de

erosão interna é a presença de um ponto de saída para a percolação sem a presença de um filtro, permitindo a remoção contínua de materiais erodidos. De acordo com o USBR (2015), se existir alguma saída ou abertura, não há potencial de filtragem por não existir filtro no ponto de saída, portanto a continuação da erosão é virtualmente certa. A Tabela 0.90 apresenta os fatores de influência na probabilidade de continuação do processo erosivo.

Tabela 0.90 - Fatores de Influência na Probabilidade de Continuação do Processo Erosivo – Existência de Filtro no Ponto de Saída da Percolação.

| Fator de influência | Virtualmente certo | Mais Provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|--|---|--------------------------|------------------|----------------------|--|
| Existência de filtro no ponto de saída da percolação | Ausente ou saída livre ⁽¹⁾ . | Presente mas Inadequado. | Sem informações. | Presente e Adequado. | Tapete drenante implantado para tratamento de surgência. |

Nota: Segundo USBR (2012), quando há uma saída aberta ou livre para o fluxo d'água, a probabilidade de continuação da erosão é virtualmente certa.

- Nó (c) – Formação do tubo

Este nó da árvore de eventos avalia a habilidade do material do maciço de suportar o teto do tubo, permitindo a ocorrência do entubamento (*piping*).

A avaliação deste nó é feita a partir da Árvore de Falhas 2 apresentada Figura 0.136 e Tabela 0.91.

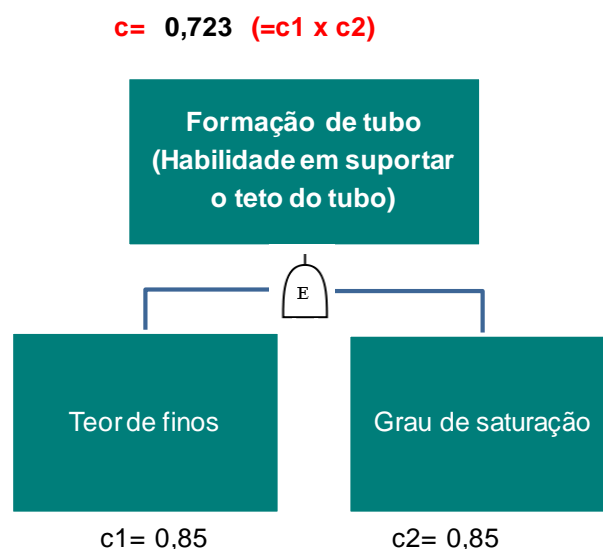


Figura 0.136 - Árvore de falhas 2 para o nó (c) da árvore de eventos.

Tabela 0.91 - Fatores de Influência na Probabilidade de Formação do Tubo - Habilidade em Suportar o Teto (modificado Foster & Fell, 2000 *apud* Fell *et. al*, 2005).

| Fator de influência | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|-------------------------------------|---|----------------------------|---------------------------------|--|
| Teor de finos (% menor que 0,075mm) | Teor de finos > 15% | Teor de finos < 15% e > 5% | Sem finos ou teor de finos < 5% | O aterro é constituído de material argilo siltoso e silte argiloso, adotou-se, o teor de finos > 15%. Baseou-se também na amostra indeformada ensaiada retirada na crista da barragem em que apontou o teor de finos de 50%. |
| Grau de saturação | Parcialmente saturado (primeiro enchimento) | - | Saturado | Admite-se que o solo está saturado e não sofre ciclos de insaturação por variação do nível do reservatório, já que a barragem opera com o NA soleira do extravasor. |

- Nó (d) – Progressão: o tubo permanece aberto

A avaliação de permanência da abertura do tubo e feita no nó (d) através da Árvore De Falhas 3 apresentada na Figura 0.137 e das considerações apresentadas na Tabela 0.92 e Tabela 0.93.

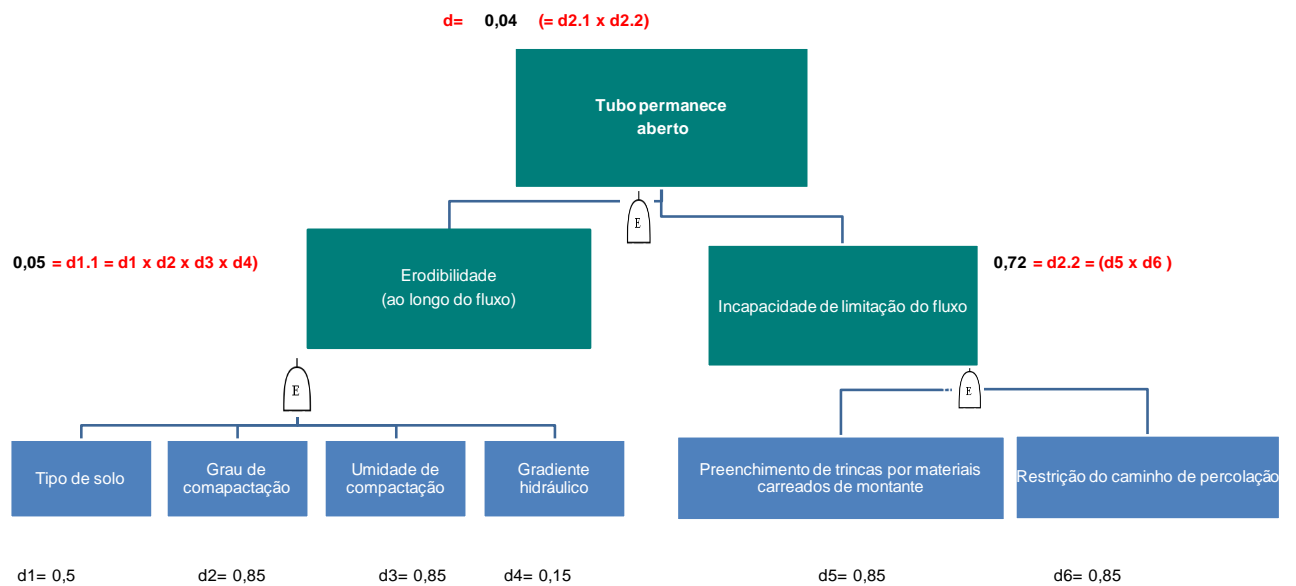


Figura 0.137 - Árvore de falhas 3 para o nó (d) da árvore de eventos – Barragem C.

Tabela 0.92 - Fatores de Influência na Probabilidade de Progressão do Tubo - Erodibilidade (ao Longo do Fluxo) (modificado Foster & Fell, 2000 *apud* Fell *et. al*, 2005) – Barragem C.

| Fator de influência | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|--|---|--|---|---|
| Tipo de solo ⁽¹⁾ | Muito uniforme, areia fina sem coesão (IP < 6) Solo bem graduado sem coesão (IP < 6) | Solo bem graduado com coesão (6 < IP < 15) | Argila plástica (IP > 15) | O aterro é constituído de material argilo-siltoso, silto argiloso e areno siltoso (com N _{SPTs} variando de 5 a 18 golpes). Embora a maioria do aterro seja formada de finos, devido à presença de material areno siltoso considerou-se a probabilidade de solo bem graduado com coesão. |
| Grau de Compactação | Mal compactado, GC < 95% do grau de compactação normal. | 95-98% do grau de compactação normal | Bem compactado, GC ≥ 98% do grau de compactação normal. | A seção típica é constituída de solo compactado. Segundo os ensaios de sondagens mistas, alguns trechos do aterro, do dique antigo e aterro atual apresentaram baixa resistência à penetração. Devido a estes valores, inferiu-se a má compactação do solo. |
| Umidade de Compactação | Mais seco do que a umidade ótima de compactação (cerca de -3% ou menor) | Compactação entre -1% e -2% da umidade ótima | Compactado na umidade ótima ou no ramo úmido | Não foram disponibilizadas informações referente a umidade de compactação. |
| Gradiente Hidráulico ⁽²⁾ | Alto | Médio | Baixo | |

Nota 1: Avaliações do material do aterro ao longo do fluxo.

Nota 2: Mesmo barragens com gradientes baixos, como 0,05 por exemplo, podem experimentar ruptura por erosão interna.

Nota 3: Caso exista a possibilidade do solo ser dispersivo, este fator de influência também poderá ser incluído nas análises, conforme Fell et. al, 2005.

Tabela 0.93 - Fatores de Influência na Probabilidade de Progressão do Tubo - Limitação do Fluxo (modificado Foster & Fell, 2000 *apud* Fell et. al, 2005).

| Fator de influência | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|--|---|--|--|---|
| Preenchimento de trinças por materiais carreados de montante | Barragem Homogênea. Zona de montante com material coesivo | - | Zona a montante do núcleo com capacidade para o preenchimento de trinças (solo não coesivo) | O material que constitui o aterro é em grande parte argilo siltoso. Os ensaios de permeabilidade a carga variável, realizada no bloco indeformado, indicaram coeficiente de permeabilidade do material do aterro igual a $4,0 \times 10^{-6}$ cm/s, da mesma ordem de grandeza dos resultados dos ensaios de infiltração realizados em campo. |
| Restrição do fluxo pelo zoneamento de montante | Barragem homogênea. Zona de alta permeabilidade a montante do núcleo | Zona a montante do núcleo com permeabilidade média a alta. | Em barragens zonadas, zona granular a montante do núcleo com permeabilidade média a baixa / Barragem com núcleo de concreto ou de enrocamento com face de concreto | |

○ NÓ (E) – INCAPACIDADE DE DETECÇÃO E INTERVENÇÃO

Este nó da árvore de eventos avalia a incapacidade de detecção e intervenção do processo

erosivo através da árvore de falhas 4 apresentada na Figura 0.138 e considerações apresentadas nas Tabela 0.94 e Tabela 0.95.

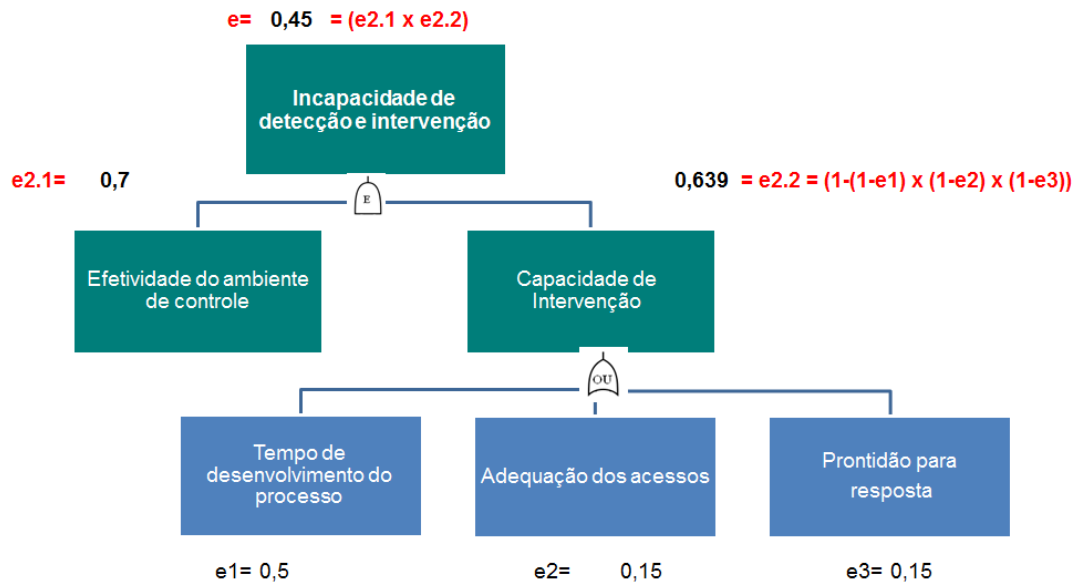


Figura 0.138 - Árvore de falhas 4 para o nó (e) da árvore de eventos – Barragem C.

Tabela 0.94 - Fatores de Influência na Probabilidade de Incapacidade de Detecção e Intervenção - Efetividade do Ambiente de Controle – Barragem C.

| Fator de influência | Mais provável | Bastante provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|--|--|---|--|---|--|
| Efetividade do ambiente de controle ⁽¹⁾ | Ambiente de controle informal ⁽²⁾ | Ambiente de controle padronizado ⁽³⁾ | Ambiente de controle monitorado ⁽⁴⁾ | Ambiente de controle otimizado ⁽⁵⁾ | Existem leituras e inspeções visuais regulares, existem Procedimentos de inspeção e monitoramento, a gestão de segurança é feita por equipe especializada, os dados são armazenados e interpretados periodicamente com planos de reposta. Possui Auditoria externa. |

Nota1: A efetividade do ambiente de controle é um indicativo da probabilidade de não identificar um risco geotécnico em tempo hábil para sua neutralização antes da ocorrência da ruptura da barragem.

Nota 2: Ambiente de controle informal: Realização de inspeções visuais e leituras da instrumentação sem padronização, com controle parcial das ocorrências identificadas e de planos de ação. Ausência de treinamento formal ou comunicação dos controles.

Nota 3: Ambiente de controle padronizado: Realização de inspeções visuais e leituras da instrumentação padronizadas e com a periodicidade adequada; com controle das ocorrências identificadas e de planos de ação de forma estruturada. A instrumentação instalada pode ser parcialmente adequada para o monitoramento dos modos de falha e os tipos de controle existentes parcialmente adequados ou insuficientes.

Nota 4: Ambiente de controle monitorado: Controles existentes adequados e suficientes e suportados por sistema informatizado bem estruturado. Existência de treinamento formal e comunicação dos controles. Os dados da instrumentação são analisados periodicamente e o banco de dados da instrumentação possui alertas automáticos.

Nota 5: Ambiente de controle otimizado: Controles existentes adequados e suficientes e suportados por sistema informatizado que integra as informações de inspeções e auditorias internas e externas e sistema padronizado de análise de riscos, permitindo tomadas de decisão rápidas e eficientes. Equipe treinada e responsabilidades bem definidas.

Tabela 0.95 - Fatores de Influência na Probabilidade de Incapacidade de Detecção e Intervenção – Capacidade de Intervenção.

| Fator de influência | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|--|--|---|---|---|
| Tempo de formação da brecha ⁽¹⁾ | Rápido (horas) | Médio (dias a semanas). | Lento (semanas ou meses) | Para erosão interna em função da concentração de fluxo ao longo de condutos enterrados, o tempo de abertura de brecha usualmente considerado é de dias a semanas. |
| Adequação dos acessos ⁽²⁾ | Acesso precário, em especial nos períodos chuvosos | Obra em local de difícil acesso. | Obra em local de fácil acesso | Acesso em bom estado de conservação. |
| Prontidão para resposta ⁽³⁾ | Inexistência de PAE, equipes sem treinamento | Existência de PAE, equipes sem treinamento. | Disponibilidade e preparo da equipe de resposta | |

Nota 1: Tempo de evolução do processo ou tempo de formação da brecha: processos que evoluem rapidamente reduzem o tempo disponível para intervenções corretivas. A métrica utilizada foi adaptada de USBR, 2012 apud Fell et al., 2003.

Nota 2: A existência de acessos adequados reduz o tempo de execução de obras emergenciais.

Nota 3: A disponibilidade do Plano de Ação Emergencial (PAE) e de equipes treinadas reduz o tempo de resposta.

○ NÓ (F) – FORMAÇÃO DO MECANISMO DE FALHA – ALARGAMENTO DO TUBO

Este nó da árvore de eventos avalia a formação do mecanismo de falha adotado alargamento de tubo. O mecanismo foi considerado por ser o mais comum de acordo com as estatísticas de ruptura de barragens. A Figura 0.139 apresenta a árvore de eventos e Tabela 0.96 apresenta os fatores de influência na probabilidade de formação de brecha - Alargamento do Tubo (modificado Foster & Fell, 2000 apud Fell et. al, 2005).

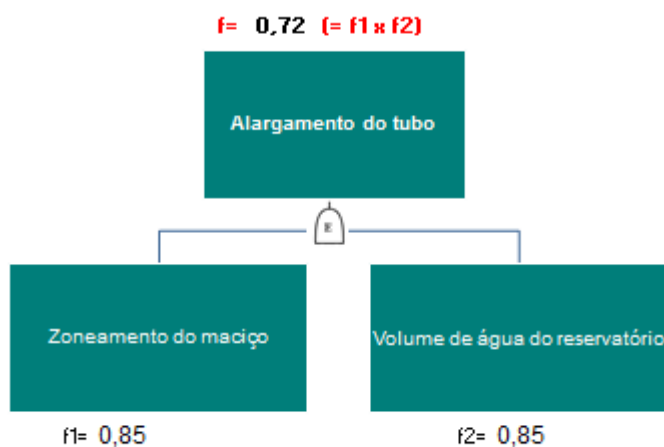


Figura 0.139 - Árvore de falhas 5 para o nó (f) da árvore de eventos – Barragem C.

Tabela 0.96 - Fatores de Influência na Probabilidade de Formação de Brecha - Alargamento do Tubo (modificado Foster & Fell, 2000 apud Fell et. al, 2005).

| Fator de influência | Mais provável | Neutro | Pouco Provável | Observação |
|---------------------------|--|--|--|--|
| Zoneamento do maciço | Seção Homogênea. Barragem zonada com zona de jusante capaz de suportar o teto do tubo | Barragem zonada, talude de jusante de areia ou pedregulho com finos. | Barragem zonada com talude de jusante de pedregulho ou enrocamento | A Barragem apresenta seção homogênea. Material fino encontrado na maior parte do maciço, inclusive na zona de jusante. |
| Volume de água armazenado | Elevado | - | Pequeno | O Volume atual do reservatório é de 1.089.830 m ³ , segundo o laudo técnico de auditoria realizado pela Leme Engenharia em 2016., disponível no documento “Técnico de Segurança de Barragem – 2016”. Sendo assim, esse volume de água disponível seria suficiente para alimentar o tubo e formar a brecha |

CONSEQUENCIAS

A Tabela 0.97 apresenta a população atingida, conforme critério estabelecido no item 3.1 deste estudo.

Tabela 0.97 – População Atingida, Potencial de Perdas de Vidas e Danos Diretos da Barragem C.

| População Atingida * | Edificações Atingidas | Perda Potencial de Vidas * |
|-------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| 504 | 812 | 100 |

Observa-se de 504 vítimas atingidas, 100 não teriam condições de saírem devido ao tempo de chegada da onda, sendo essas consideradas como perda potencial de vidas. Para o restante seria possível realizar a evacuação.

CÁLCULO DO RISCO

A maior probabilidade de ocorrência de falha para a barragem C foi a galgamento, calculada

em 1×10^{-4} . A consequência, considerando as perdas de vidas, obtida na mancha de inundação, foi mensurada em 100 vidas perdidas dentro da Zona de Autossalvamento. O produto destas duas informações plotado no gráfico da Figura 0.140, indicou que existe um risco inaceitável.

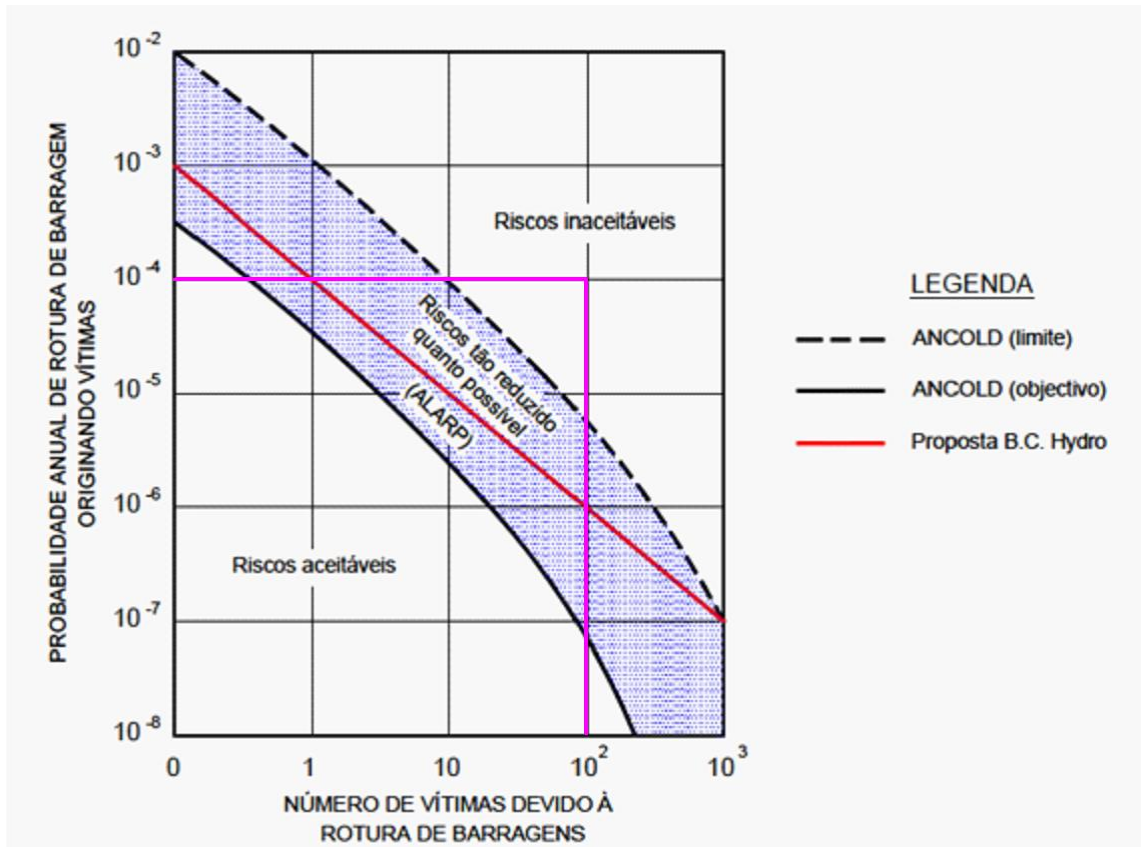


Figura 0.140 - Risco Aceitável da Barragem C.

AÇÕES PARA REDUZIR OS RISCOS DE FALHAS

De acordo com a Tabela 0.12, quando a barragem for classificada como “Risco a Inaceitável”, deverão ser implementadas medidas imediatas, reduzindo a probabilidade de ocorrência de um modo de falha ou diminuindo/ extinguindo as consequências catastróficas.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES DOS RESULTADOS

BARRAGEM A

O presente estudo apresentou as avaliações para a estimativa da probabilidade de ruptura da Barragem A. Dentre os quatro modos de falha considerados (galgamento, erosão interna, instabilização e liquefação), foram analisados os aplicáveis à estrutura em questão, o que exclui o modo de liquefação. Na Tabela 0.98 é apresentado o resumo dos resultados obtidos nas análises dos modos de falha de galgamento, erosão interna e instabilização.

Tabela 0.98 - Probabilidades de ocorrência dos modos de falha da Barragem A.

| Modo de Falha | | Probabilidade de Ruptura |
|---------------|----------------|--------------------------|
| A | Galgamento | $1,00 \times 10^{-8}$ |
| B | Instabilização | $1,00 \times 10^{-8}$ |
| C | Erosão Interna | $6,00 \times 10^{-5}$ |

A partir dos estudos realizados, devem ser destacados os seguintes aspectos:

- A estimativa da probabilidade de ruptura da barragem associada ao galgamento foi realizada a partir de cálculos hidrológico-hidráulicos desenvolvidos para identificar o período de retorno associado ao evento pluvio-fluviométrico que acarretaria o galgamento da barragem. Como os resultados de ambos os cenários analisados indicaram que a barragem não seria galgada, mantendo-se ainda borda livre mínima de 0,03 m para o Cenário 1 e 0,44 m para o Cenário 2, atribuiu-se para este modo de falha a probabilidade $P_f = 1,00 \times 10^{-8}$
- A estimativa da probabilidade de ocorrência do modo de falha instabilização foi realizada a partir de análises de estabilidade utilizando-se o programa Slide 5.0® e aplicando-se os métodos probabilísticos FOSM e MCS, considerando três cenários distintos: níveis piezométricos atuais durante o enchimento do reservatório ($P_f < 10^{-8}$), níveis piezométricos operacionais após o enchimento do reservatório ($P_f < 10^{-8}$) e níveis piezométricos elevados ($P_f < 10^{-8}$);

- A estimativa da probabilidade de ocorrência do modo de falha erosão interna foi realizada a partir da combinação de árvores de eventos e árvores de falhas, considerando dois eventos iniciadores distintos: erosão interna pelo maciço por instabilização por sufusão ($P_f = 6 \times 10^{-5}$).

Ressalta-se que a confiabilidade dos resultados de probabilidade apresentados depende diretamente da confiabilidade dos dados utilizados. Para a Barragem A foram utilizados parâmetros geotécnicos provenientes de ensaios nos materiais de aterro e fundação e as análises estatísticas realizadas com resultados de poucos ensaios.

BARRAGEM B

O presente relatório apresentou as avaliações para a estimativa da probabilidade de ruptura da Barragem B. Dentre os quatro modos de falha (galgamento, erosão interna, instabilização e liquefação), foram analisados. Tabela 0.99 é apresentado o resumo dos resultados obtidos nas análises dos modos de falha de galgamento, erosão interna e instabilização.

Tabela 0.99 - Probabilidades de ocorrência dos modos de falha

| | Modo de Falha | Probabilidade de Ruptura |
|---|----------------------|---------------------------------|
| A | Galgamento | $1,0 \times 10^{-8}$ |
| B | Instabilização | $1,0 \times 10^{-8}$ |
| C | Erosão Interna | 2×10^{-6} |

A partir dos estudos realizados, devem ser destacados os seguintes aspectos:

- A estimativa da probabilidade de ruptura da barragem associada ao galgamento foi realizada a partir de cálculos hidrológico-hidráulicos desenvolvidos para identificar o período de retorno associado ao evento pluvio-fluviométrico que acarretaria o galgamento da barragem. Como os resultados de ambos os cenários analisados indicaram que a barragem não seria galgada, mantendo-se ainda borda livre mínima de 0,63 m para o Cenário 1 e 0,25 m para o Cenário 2, atribuiu-se para este modo de falha a probabilidade $P_f = 1,0 \times 10^{-8}$;

- A estimativa da probabilidade de ocorrência do modo de falha instabilização foi realizada a partir de análises de estabilidade utilizando-se o programa Slide 7.0® e aplicando-se os métodos probabilísticos FOSM e MCS, considerando dois cenários distintos: níveis piezométricos normais de operação considerando o NA soleira do extravasor ($P_f < 10^{-8}$) e níveis piezométricos elevados considerando a colmatação da drenagem interna ($P_f < 10^{-8}$);
- A estimativa da probabilidade de ocorrência do modo de falha erosão interna foi realizada a partir da combinação de árvores de eventos e árvores de falhas. A probabilidade de ruptura apresentada é referente à erosão interna por fluxo concentrado no contato com paredes de concreto, que apresentou maior probabilidade de ocorrência, ($P_f = 2 \times 10^{-6}$).

Ressalta-se que a confiabilidade dos resultados de probabilidade apresentados depende diretamente da confiabilidade dos dados utilizados. Para a Barragem B foram utilizados parâmetros geotécnicos provenientes de ensaios nos materiais de aterro e fundação e as análises estatísticas realizadas com resultados de poucos ensaios.

BARRAGEM C

O presente relatório apresentou as avaliações para a estimativa da probabilidade de ruptura da Barragem C. Dentre os quatro modos de falha considerados (galgamento, erosão interna, instabilização e liquefação), foram analisados os aplicáveis à estrutura em questão, o que exclui o modo de liquefação. Na Tabela 0.100 é apresentado o resumo dos resultados obtidos nas análises dos modos de falha de galgamento, erosão interna e instabilização.

Tabela 0.100 - Probabilidades de ocorrência dos modos de falha.

| | Modo de Falha | Probabilidade de Ruptura |
|---|----------------|--------------------------|
| A | Galgamento | 1×10^{-4} |
| B | Instabilização | $3,7 \times 10^{-8}$ |
| C | Erosão Interna | 3×10^{-5} |

A partir dos estudos realizados, devem ser destacados os seguintes aspectos:

- A estimativa da probabilidade de ruptura da barragem associada ao galgamento foi realizada a partir de cálculos hidrológico-hidráulicos desenvolvidos para identificar o período de retorno associado ao evento pluvio-fluviométrico que acarretaria o galgamento da barragem. Como os resultados de ambos os cenários analisados indicaram que a barragem seria galgada, para o Cenário 2, atribuiu-se para este modo de falha a probabilidade $P_f = 1 \times 10^{-4}$;
- O Dique Antigo é composto por solo normalmente adensado com textura silto argilosa, portanto, pressupõe-se que o mesmo responderia de forma não drenada a carregamentos. Portanto, haja vista uma possível suscetibilidade à liquefação torna-se imprescindível a realização de investigações do material que compõe o Dique Antigo e o Antigo Bota-fora, através de ensaios de laboratório e ensaios de campo, visando consolidar os parâmetros geotécnicos para posterior análise de ruptura por liquefação;
- A estimativa da probabilidade de ocorrência do modo de falha instabilização foi realizada a partir de análises de estabilidade utilizando-se o programa Slide 7.0® e aplicando-se os métodos probabilísticos FOSM e MCS, considerando dois cenários distintos: níveis piezométricos atuais durante o enchimento do reservatório ($P_f < 10^{-8}$) e níveis piezométricos elevados;
- A estimativa da probabilidade de ocorrência do modo de falha erosão interna foi realizada a partir da combinação de árvores de eventos e árvores de falhas, considerando dois eventos iniciadores distintos: erosão interna pelo maciço por concentração de fluxo ao longo de condutos enterrados ($P_f = 3 \times 10^{-5}$).

Ressalta-se que a confiabilidade dos resultados de probabilidade apresentados depende diretamente da confiabilidade dos dados utilizados. Para a Barragem C foram utilizados parâmetros geotécnicos provenientes de correlações com o N_{SPT} bem como as análises estatísticas realizadas.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando todos os estudos, aqui apresentados, nota-se que a existência de dados e estudos realizadas na barragem de fundamentais para os cálculos de probabilidade. Quanto maiores forem as incertezas, mais conservadores serão os parâmetros adotados, implicando em resultados de maiores probabilidade de ocorrência do modo de falha. Portanto, uma maneira de realizar gestão da barragem é elaborando projetos bem embasados, com critérios nos dimensionamentos, realização de ensaios e buscando o máximo de informações possíveis. O estudo mostra a importância de se conhecer as características da estrutura, minimizando a penalização nos cálculos de ocorrência de uma falha.

Optou-se pelo gráfico da ANCOLD, pois o mesmo estabelece que uma probabilidade de ocorrência de uma falha na ordem de 10^{-4} é um risco que deverá ser reduzido, independente da consequência.

O objetivo maior do presente estudo é reduzir a subjetividade das classificações utilizadas na legislação brasileira de barragens de mineração, indicando uma metodologia em que é possível estimar riscos aceitáveis e ações deverão ser implementadas buscando sempre que a barragem passe para o nível de risco aceitável.

Nota-se, que de acordo com a metodologia da ANM todas as barragens cujos estudos de caso foram apresentados, foram classificadas como B, ou seja, risco baixo e Dano Potencial Alto. Mas o estudo indicou diferentes classificações para as barragens e diferentes ações para cada uma. Os estudos indicados pela ANM são insuficientes para um diagnóstico de risco de barragens, sendo recomendada a metodologia aqui apresentado.

Por fim, conclui-se que, barragens são estruturas eficientes, boas soluções de custo e benefício para a aplicação em mineração. O grande número de acidentes registrados indica a ausência de

uma gestão de risco, o que denegriu a imagem de uso de barramentos. É importante ressaltar que gestões de risco bem aplicadas, é a solução para minimizar ou até mesmo exterminar os acidentes com barragens. Portanto, objetiva-se, sempre, atingir risco aceitáveis, com baixa probabilidade de ocorrência de uma falha e baixa consequência com perda de vidas.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 13.028:2006 Associação Brasileira de Normas Técnicas. Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água. 2006.

ABNT NBR ISO 31.000:2009 Associação Brasileira de Normas Técnicas. Gestão de riscos — Princípios e diretrizes. 2009.

ABNT NBR ISO 31.010:2012 Associação Brasileira de Normas Técnicas. Gestão de riscos — Técnicas para o processo de avaliação de riscos. 2012.

Agência Nacional de Mineração (ANM, 2017). Portaria DNPM N° 70.389 de 17 de maio de 2017. Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração.

Bureau of Reclamation (2010). Chapter 24, Internal Erosion and Piping Risks for Embankments. Technical Service Center, Denver, Colorado

Bureau of Reclamation (2015). Chapter IV-4, Internal Erosion Risks for Embankments and Foundations. Technical Service Center, Denver, Colorado.

Agência Nacional do Águas (Brasil). Instruções para Apresentação do Plano de Segurança da Barragem. -- Brasília: ANA, 2016.

BAECHER, G. B. & Christian, J.T. (2003). Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. John Wiley and Sons LTD, England, 605 p.

CETESB. Risco de acidente de origem tecnológica – método para decisão e termos de referência. (2011). Norma técnica 261. 2ª edição.

COLLE, Giselle de Andrade. Metodologia de Análise de Risco para Classificação de Barragens Segunda a Segurança. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

FELL, R. (1994). Landslide. Risk Assessment an Acceptable Risk. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, pp. 261-272.

FELL, R., Macgregor, P., , D., Bell, G. (2005). Geotechnical Engineering of Dams.

FELL, R. & Fry, J.J (eds.) (2007). Internal Erosion of Dams and Their Foundations, 245 p.

FUSARO, T.C. Metodologia de classificação de barragens baseada no risco. Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig), 12 p. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS (SNGB), 25., out. 2003, Salvador, BA. XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens – Anais.

NAGHETTINI, M., PINTO, E.J.A. Hidrologia Estatística. Belo Horizonte. CPRM, 2007.

MELO, Alexandre Vaz de. Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

PINHEIRO, M. C. Diretrizes para Elaboração de Estudos Hidrológicos em Obras de Mineração. Porto Alegre: ABRH, 2011. 308 p.

REZENDE, Diego Alves de. Análise Probabilística de Estabilidade de Taludes em Barragens de Rejeitos. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

ROQUE, Leandro Antônio, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, Outubro de 2013. Áreas de risco geológico-geotécnico associadas a movimentos de massas no núcleo urbano de Viçosa-MG. Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques. Coorientador: Joel Gripp Junior.

SPENCER, E. E. A method of the analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces. Géotechnique, London, 1967.

SILVA, Tatiana Quintão, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, Fevereiro de 2016. Análise de risco geológico-geotécnico em áreas sujeitas à movimentos de massa. Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques

Taguchi, g. (2014). “Fault Tree Analysis of Slurry and Dewatered Tailings Management – a Frame Work”. Dissertação de mestrado pela University of British Columbia, Vancouver, Canadá.

VICK, S. G. (1997). Dam Risk Assessment: New Directions. Water Power and Dam Construction, Vol 49, No 5, pp 40-42.

USACE. (2013). Estimating USACE Capital Stock, 1928 to 2011.

USBR - 26-InternalErosion20121207 Disponível em:
<http://www.usbr.gov/ssle/damsafety/Risk/methodology.html>, 2014.

USBR (2012) - 16-FloodOvertopping20121126. Disponível em:
<http://www.usbr.gov/ssle/damsafety/Risk/methodology.html>, 2014.

DECLARAÇÃO

Eu, Ana Paula Magalhães Tavares, declaro que esta dissertação intitulada Metodologia de Gestão de Risco de Barragens de Rejeitos de Minério com vistas á fiscalização é inteiramente e exclusivamente de minha autoria e que, com exceção das citações diretas e indiretas claramente indicadas e referenciadas nesse trabalho, e do uso autorizado de banco de dados, seu texto, figuras, gráficos, quadros, tabelas, algoritmos e demais dados foram por mim obtidos e, portanto, não contêm plágio.

Assinatura: 

Data: 03/03/2021