

Aplicação do Modelo FMEA/FMECA ao Gerenciamento de Riscos em Barragens

FMEA/FMECA Analysis Applied to Risk Management in Dams

MENDES, D. E.

*Eng° Daniel Etchegaray Mendes
etchegaray.eng@gmail.com*

Resumo

O gerenciamento de risco em barragens exige constantemente dos responsáveis pela segurança que sejam decididas quais ações e medidas serão adotadas no empreendimento para a manutenção ou reestabelecimento do nível de segurança. A falta de informações acerca do projeto ou das alterações realizadas durante as fases construtiva e operativa, acaba agregando incertezas e subjetividade a este processo, incorrendo na adoção de medidas nem sempre relevantes para a mitigação dos riscos no empreendimento. O objetivo deste trabalho é avaliar os benefícios da utilização de um modelo de análise de risco no processo de tomada de decisão, sendo escolhido o modelo FMEA/FMECA para aplicação às estruturas de uma barragem de acumulação de água para geração hidrelétrica.

Palavra-Chave: FMEA, Riscos, Gerenciamento de Riscos, Análise de Riscos

Abstract

Risk management in dam safety usually demands decision making on which safety measures will be carried out, in order to maintain or restore reliability level of the structure. Lack of information about design or changes made during constructive and operational phases increase the uncertainty and subjectivity to this procedure, incurring in adoption of safety measures that often won't lead to a reduction of risks. This paper aims to evaluate the benefits on using a risk analysis method to support decision making, where FMEA/FMECA analysis was applied to a hydroelectric powerplant.

Keywords: FMEA, Risk, Risk Analysis, Risk Management

1 - Introdução

A utilização de barragens para acumulação de água está intimamente associada ao desenvolvimento das civilizações mais remotas, tendo-se registros de barragens construídas pelos povos da Babilônia, Egito, Índia, Pérsia e extremo oriente há mais de 5.000 anos (Jansen, 1980 apud Balbi, 2008). As primeiras estruturas foram construídas de forma rudimentar, com aplicação de aluviões disponíveis ao longo de córregos para composição do corpo do aterro (Jansen, 1988 apud Melo, 2014). Desde então, a concepção de barragens passou por muitas evoluções, com melhorias nas técnicas construtivas e utilização de blocos de rocha e alvenaria.

Os maiores avanços tecnológicos ocorreram em meados do século XX, permitindo a melhoria nas técnicas construtivas de transporte e compactação dos materiais do aterro e impulsionando a construção de grandes estruturas (Melo, 2014). Este avanço se refletiu no aumento significativo do número de reservatórios construídos neste século, representando a maior parte de todos os reservatórios existentes atualmente (Balbi, 2008). No entanto, estas estruturas, construídas em tempos passados, agora passam a enfrentar os efeitos do “envelhecimento”, o qual pode se revelar em diversas esferas do empreendimento.

Budweg (1991) classifica as forças e agentes que provocam o envelhecimento de uma barragem em dois fatores: (i) “materiais”, os quais se manifestam fisicamente e sua evolução pode ser observada e medida; e (ii) “não materiais”, os quais são resultado das mudanças nos requisitos operacionais, evolução tecnológica e dos critérios de segurança que levam à obsolescência da estrutura mesmo sem alteração física. A ação dos fatores materiais – como deterioração por intemperismo, desgaste natural dos equipamentos, etc – pode ser, em grande parte, minimizada ou adiada por medidas eficientes de manutenção.

Na proposição de medidas para manutenção da segurança de um empreendimento, Fusaro (1997) propõe que sejam considerados 4 pilares fundamentais:

- Segurança estrutural – no qual a barragem deve ser capaz de suportar todos os esforços aplicados a ela durante sua vida útil;
- Segurança funcional/ operacional – aonde a barragem deve estar apta a cumprir todas as suas funções e finalidades;
- Segurança ambiental – aonde a barragem não deve ter impactos prejudiciais sobre o meio ambiente ou a terceiros, nem ser afetada por alterações do meio provocadas por ação humana; e
- Segurança hidrológica – aonde a barragem deve ser capaz de descarregar as cheias de projeto sem prejuízo à estabilidade estrutural.

De um modo geral, a segurança de barragens no mundo tem sido controlada por atendimentos à normas de segurança, constituindo-se em um meio eficiente de “gestão de risco” devido ao baixo percentual deste tipo de empreendimento que apresenta falha,

conforme exposto por Melo & Fusaro (2015). Critérios desenvolvidos por órgãos como o U. S. Bureau of Reclamation e Eletrobrás apresentam diretrizes técnicas para elaboração de projetos e estudos de usinas hidrelétricas, apresentando uma abordagem mais determinística, aonde as incertezas dos parâmetros que podem provocar falha nas estruturas são condensadas em coeficientes de majoração dos carregamentos e minoração dos esforços resistentes, resultando em um fator de segurança que deve ser mantido acima dos limites estabelecidos.

Uma nova abordagem, no entanto, vem ganhando espaço entre os responsáveis por segurança de barragens: a aplicação de métodos estatísticos (classificação com base em um conjunto de barragens com características semelhantes com critérios de análise coerentes) e métodos probabilísticos (englobando a variabilidade aleatória de materiais de construção e de carregamentos desestabilizantes). Nesta análise, os processos estocásticos são contemplados e tem-se, por resultado, um valor qualitativo ou quantitativo que reflete a probabilidade de falha da barragem, permitindo sua apreciação quanto a critérios de aceitabilidade e tolerabilidade de risco, conforme será tratado posteriormente.

Vê-se, portanto, que apesar dos avanços tecnológicos ocorridos nas últimas décadas, ainda existem muitas limitações que devem ser reconhecidas quando se trata de segurança de barragens (Melo & Fusaro, 2015). Neste contexto, justifica-se a necessidade de um plano de gestão de riscos eficiente, aplicado à manutenção da segurança das barragens e auxiliado pelo recolhimento de dados das diversas fases (projeto, construção, operação, manutenção), inspeções de segurança regulares e modelos de análise de risco, fomentando o conhecimento do nível de segurança do empreendimento e auxiliando no processo de tomada de decisão de medidas preventivas e corretivas eficientes.

2 - Fundamentação Teórica

2.1 - As Barragens e a Percepção do Risco

A construção de barragens de contenção de água, para abastecimento ou geração de energia, trouxe grandes benefícios e permitiu o desenvolvimento da sociedade moderna como um todo. Dentre os principais benefícios do represamento de rios naturais, ICOLD (2005) aponta o armazenamento de água proveniente dos períodos chuvosos para uso durante as épocas de estiagem, permitindo o desenvolvimento considerável das áreas agricultáveis, bem como a necessidade crescente de energia elétrica devido ao aumento da população. A disponibilidade hídrica, somada à geração hidroelétrica, formou a base para o desenvolvimento humano, tecnológico e o crescimento populacional.

O armazenamento da água proveniente de eventos de cheia também reduziu os impactos causados por estes eventos extremos nas populações ribeirinhas, fato que desencadeou um constante crescimento da ocupação destas áreas localizadas nos vales a jusante de grandes barragens. No entanto, acabou por desencadear no meio técnico uma nova

preocupação: o risco de falha da estrutura de contenção e suas consequências no vale de jusante.

Viseu & Almeida (2010) citam em seu artigo que a frequência anual média de ruptura de grandes barragens existentes é bastante baixo, da ordem de 10^{-4} , atingindo valores de 10^{-6} quando se analisam apenas as barragens construídas recentemente. Nota-se, no entanto, que apesar de sua baixa frequência anual, a ruptura de uma barragem figura como um evento de proporções catastróficas, com consequências potenciais muito significativas no vale de jusante.

Estas duas variáveis citadas no parágrafo anterior (probabilidade e consequência) estão envolvidas no conceito de 'risco' atualmente mais aceito entre a comunidade científica ligada a barragens, definido por Pimenta (2009) como o produto entre a probabilidade de ocorrência de falha da estrutura e as respectivas consequências deste evento.

Pimenta (2009) afirma, ainda, que o risco é uma quantificação matemática que deverá traduzir, em um determinado instante, o conhecimento da condição atual da barragem, seu desempenho futuro e as consequências de uma eventual ruptura, sendo, portanto, uma grandeza variável ao longo da vida útil da obra, necessitando de revisões periódicas.

O risco, em sua concepção geral, é inerente a qualquer atividade relacionada ao dia-a-dia, seja ele consciente ou inconsciente. Todas as atividades humanas implicam em risco, embora estes variem muito em magnitude e consequências. Os inúmeros riscos existentes podem ser subdivididos nas seguintes categorias (Viseu et al, 2013):

- os riscos naturais: são riscos em sua maioria considerados não evitáveis, inconscientes ou desconhecidos;
- os riscos involuntários ou impostos: são riscos teoricamente evitáveis, mas inerentes à vida quotidiana da sociedade moderna; e
- os riscos voluntários: tratam-se de riscos evitáveis, pelo qual um indivíduo ou sociedade aceita estar submetido desde que os benefícios se sobreponham claramente ao receio de um acidente.

Quanto à sua origem, (Viseu et al, 2013) classifica, ainda, os riscos em tecnológicos – aqueles criados ou impostos pelo próprio homem – e naturais – aqueles provocados por eventos meteorológicos, geofísicos ou ambientais. Nestas condições, pode-se classificar o evento de ruptura de uma barragem como um risco imposto e tecnológico.

A percepção do risco por um indivíduo e pela sociedade em geral é entendida como uma ação subjetiva, geralmente influenciada pela natureza do risco. O risco individual é caracterizado por ICOLD (2005) como o incremento de risco imposto a um indivíduo em particular pela existência de uma instalação perigosa, enquanto que o risco coletivo compreende os riscos que provocam uma discussão pública mais ampla a respeito das medidas de implantação, seja por suas consequências ou pela forma como é entendido e recebido pela sociedade. Como exemplo, pode-se destacar a reação da sociedade frente a diferentes tipos de acidentes, onde há uma tendência de acidentes pouco frequentes,

mas envolvendo um elevado número de vítimas, serem menos aceitáveis do que acidentes frequentes, mas envolvendo um menor número de vítimas por evento, mesmo que a taxa de fatalidades de longo termo, em ambos os casos, seja equivalente (Morris, Hewlett & Elliot, 2000).

Esta percepção do risco pode ainda variar, assumindo um significado diferente quando concebida por especialistas ou por leigos, sejam eles o indivíduo comum ou a sociedade, reunida em grupos sociais. Relativamente a este aspecto verifica-se que existem basicamente duas vertentes da sociologia (Viseu et al, 2013):

- a que defende que apesar do leigo ter muitas vezes falta de informação sobre determinados riscos, a sua conceitualização básica do risco é muito mais rica que a dos especialistas e reflete preocupações legítimas que muitas vezes são omitidas nas apreciações técnicas do risco (Salmon & Hartford, 1995);
- a que defende que só é possível comparar riscos que são calculados de uma maneira similar, afigurando-se como uma obrigação ética por parte das várias especialidades a tarefa de desenvolver “métodos mais racionais” na definição do conceito do risco, devendo-se assumir que existem muitos aspectos humanos que não podem ser incorporados numa apreciação racional de riscos.

A apreciação do risco com base na segunda vertente é trabalhada na sinalização do número de vítimas e dos prejuízos económicos, sendo eles as consequências quantificáveis resultantes dos danos materiais nas propriedades do vale de jusante, das atividades económicas (agrícolas, industriais, comerciais) e das infraestruturas (como a própria barragem), desconsiderados os demais custos indiretos (Viseu et al, 2013).

A aceitabilidade e a tolerabilidade dos riscos devem ser cuidadosamente distinguidas para se realizar uma análise assertiva quanto à avaliação do risco. HSE (1995) define como “risco aceitável” todo o risco no qual, por motivo de necessidade diária ou trabalho, todos que podem ser afetados estão preparados para aceitar, sem assumir nenhuma mudança nos mecanismos de controle de risco. O “risco tolerável” é definido como o risco que parte da sociedade pode conviver, o qual não pode ser ignorado ou negligenciado, mas que deve ser mantido sob controle e reduzido tanto quanto possível ICOLD (2005).

Geralmente, os riscos sociais são calculados por curvas FN, estabelecidas em termos do número de vítimas “N” e a respectiva probabilidade anual de ruptura (ou frequência “F” acumulada, por barragem por ano), com um valor esperado de vítimas igual ou superior a “N” (Veiga Pinto, 2008). Salmon & Hartford (1995) apresentam no gráfico da Figura 2.1 a classificação de diversas atividades (não necessariamente correlatas a barragens) quanto à sua probabilidade de ocorrência e prejuízos associados, criando uma base uniforme para julgamento dos critérios de percepção do risco sobre uma ótica racional e padronizada a todas as atividades.

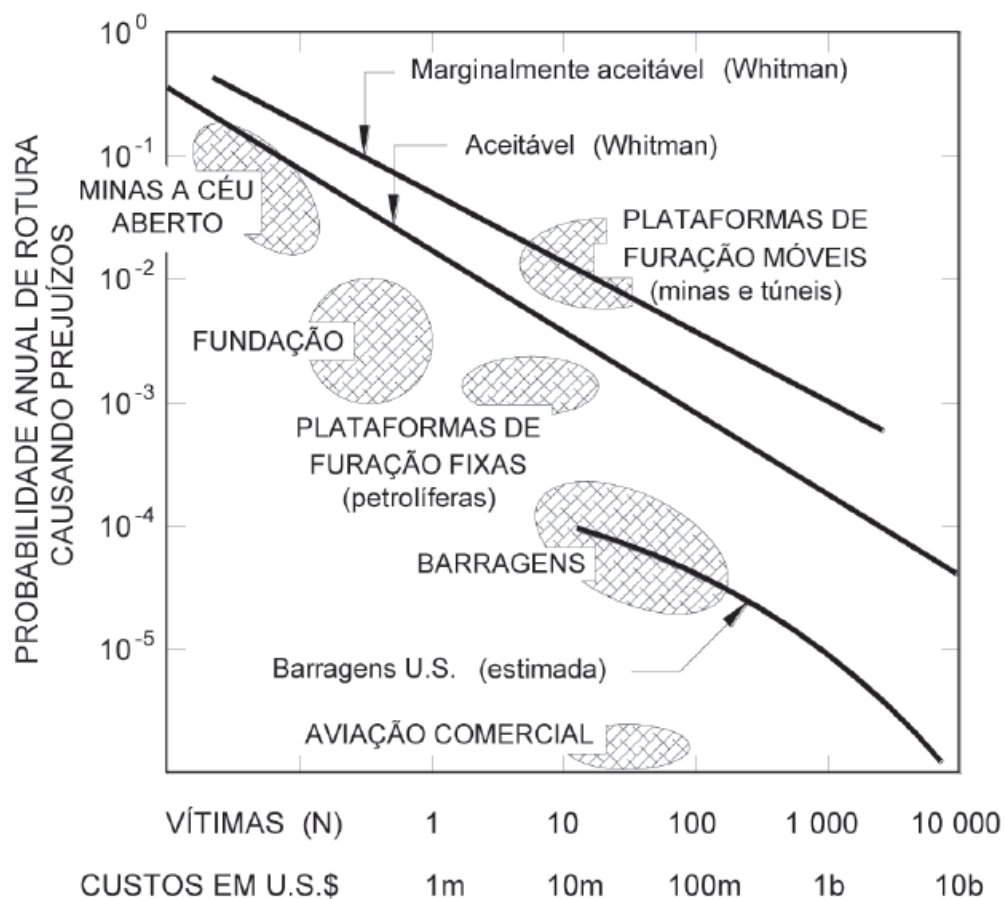


Figura 2.1 - Probabilidade de falhas de diversas atividades relacionadas (fonte: Salmon & Hartford, 1995) .

Existem critérios desenvolvidos especificamente para a apreciação dos níveis de risco associados às barragens e que foram elaborados por organismos responsáveis pela segurança das mesmas em países como a Austrália (o Australian National Committee on Large Dams “ANCOLD”), o Canadá (a B.C.Hydro) e a África do Sul (o South Africa National Committee on Large Dams - SANCOLD).

Um dos critérios com maior divulgação a nível mundial foi o desenvolvido pelo ANCOLD (2003), que adaptou um princípio inicialmente desenvolvido para quantificar o risco nos transportes ao contexto de segurança de barragens. A metodologia proposta baliza o risco entre um limite superior máximo (“risco máximo”), a partir do qual o risco é considerado inaceitável pois injustificado, e um limite inferior (“risco ótimo”), abaixo do qual o risco deixa de ser uma preocupação legal, podendo ser considerado negligenciável. Entre estas duas zonas, está situada a zona ALARP (“As Low As Reasonably Possible”), aonde os riscos são toleráveis mas se exige a implantação de medidas de segurança (estruturais e não estruturais) de modo a reduzi-lo, tanto quanto possível, para aproximar-se do limite inferior. Esta proposição está representada na Figura 2.2.

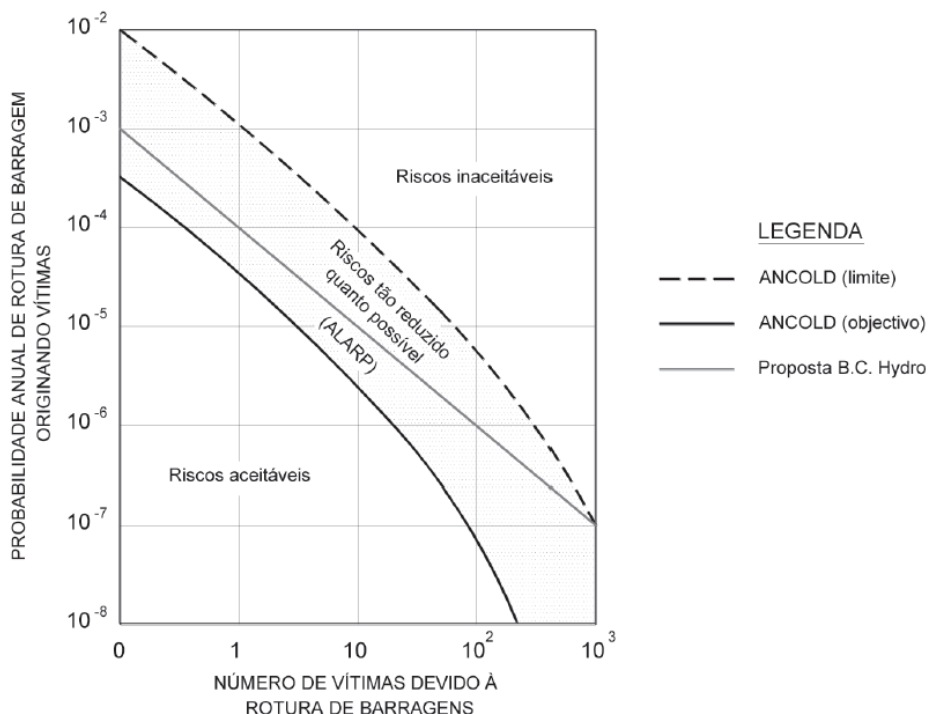


Figura 2.2 – Curvas FN de critérios de aceitação definidos pela ANCOLD e B. C. Hydro (fonte: Salmon & Hartford, 1995).

Neste item, foram abordados os diversos conceitos de risco e sua percepção individual e coletiva. No próximo item, serão abordados os mecanismos de gestão de riscos aplicados à segurança de barragens.

2.2 - A Gestão de Riscos em Barragens

O aumento da preocupação com a segurança de barragens deve-se principalmente a elevada durabilidade das estruturas, as quais levam ao envelhecimento natural dos seus componentes, muitos deles com tempo de operação superior ao período de vida para o qual foram dimensionados, podendo refletir no aumento da probabilidade de falha e na magnitude das consequências envolvidas (Pimenta, 2009).

O Sistema de Segurança Integrada, citado por Almeida, consiste em um sistema de manutenção de segurança global baseado em 3 pilares operacionais fundamentais, sendo eles:

- **Técnico/Operacional:** compreende as medidas de controle de segurança estruturais, hidráulicas e operacionais que devem ser aplicadas a todas as fases do empreendimento (projeto, construção, operação e descomissionamento);

- **Monitoramento/Vigilância:** compreende as medidas de monitoramento durante a fase de operação, envolvendo inspeção, detecção, previsão e prevenção de curto/médio prazo de emergências e situações de crise; e
- **Gestão de Risco/Emergência:** compreende a implementação e preparação das medidas e procedimentos necessários para controle do risco ou resposta a eventuais acidentes ou incidentes que possam ocorrer em uma barragem.

Estes 3 pilares devem agir de forma integrada de modo a alcançar o objetivo maior, o qual consiste em garantir a segurança da barragem e a proteção do vale de jusante da forma mais eficaz possível, cabendo aos responsáveis pela segurança realizar esforços no sentido de identificar e gerir todo e qualquer risco residual nas estruturas (Viseu et al, 2013). Neste sistema, portanto, a gestão do risco compreende um dos pilares para manutenção da segurança da barragem.

A gestão do risco, conforme Pimenta (2009), é definida como o desenvolvimento integrado das atividades de avaliação do risco (análise e apreciação) e de controle do risco, conforme apresentado no fluxograma da Figura 2.3.

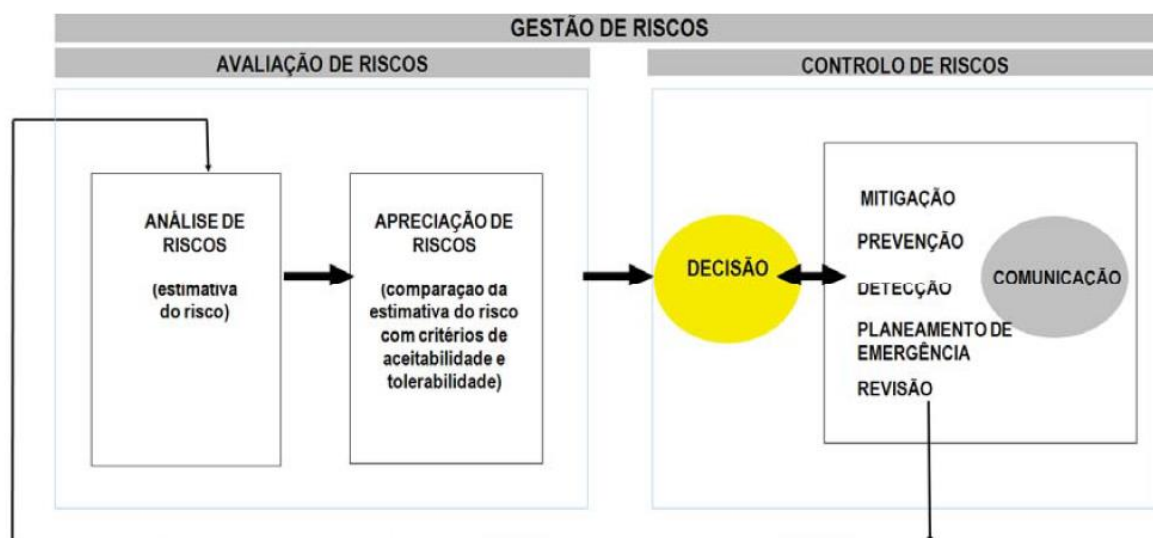


Figura 2.3 – Atividades fundamentais na gestão do risco (fonte: Pimenta, 2009).

Nota-se que, nesta análise, a etapa de identificação do risco não foi explicitamente representada, consistindo em uma atividade anterior ao processo de gerenciamento. Outras bibliografias, como ISO 31.000 (ABNT, 2009), incluem a etapa de identificação do risco como parte do processo de avaliação de riscos, conforme sintetizado a seguir.

Identificação de riscos	Processo de busca, reconhecimento e descrição de riscos, que envolve a identificação das fontes de risco, eventos, suas causas e suas consequências potenciais, podendo fazer uso de dados históricos, análises teóricas, opiniões de pessoas informadas e especialistas, e as necessidades das partes interessadas.
Análise de riscos	Processo de compreender a natureza do risco e determinar o nível de risco, ou seja, a magnitude de um risco expressa em termos da combinação das consequências e de suas probabilidades.
Avaliação (ou apreciação) de riscos	Processo de comparar os resultados da análise de riscos com os critérios de riscos para determinar se o risco e/ou sua magnitude é aceitável ou tolerável.

Em suma, Melo (2014) apresenta a definição de gestão de risco como a “aplicação sistemática, coordenada e integrada de políticas de gestão, procedimentos e práticas para as tarefas de identificação, análise, avaliação, mitigação e controle do risco”.

A seguir, discorrer-se-á, de forma mais aprofundada, sobre os conceitos envolvidos na avaliação e gestão de riscos.

2.2.1 - Avaliação de Riscos

Conforme exposto anteriormente, a avaliação de riscos trata da etapa que antecede ao processo de tomada de decisão, apresentando um panorama geral sobre as medidas necessárias à diminuição das incertezas que podem culminar na falha da estrutura (ICOLD, 2005). Segundo Salmon (1995) apud Menescal (2001), a avaliação de risco tem como meta responder a 3 perguntas fundamentais:

1. O que pode dar errado? (ameaça)
2. Quão provável é sua ocorrência? (probabilidade)
3. Quais os danos causados caso venha a ocorrer? (consequência)

Busca-se, portanto, identificar todas as possíveis falhas que podem vir a ocorrer nas estruturas em análise e mapear suas probabilidades de ocorrência e as consequências envolvidas. Estes processos estão sintetizados nas etapas de identificação, análise e apreciação do risco, conforme será tratado a seguir.

- Identificação do Risco

De um modo geral, o processo de identificação de riscos (ou ameaças) pode ou não estar inserido na etapa de avaliação do risco, dependendo da abordagem analisada, ainda que

seu desenvolvimento seja imprescindível para a elaboração de uma gestão de riscos eficiente.

O processo inicia-se pela identificação de todas as possíveis ameaças que podem levar a uma alteração nas condições de segurança das estruturas, listando-se os modos de falhas e as possíveis sequências de rupturas. Nesta etapa, busca-se estressar ao máximo os aspectos que podem culminar na ruptura da barragem, analisando-se os pontos de fragilidade, mesmo que as fontes ou causas dos riscos possam não ser evidentes. Esta análise deve ser feita preferencialmente junto a uma equipe multidisciplinar, de modo que possa contemplar a interdisciplinaridade dos processos envolvidos. A identificação abrangente é crítica, pois os riscos que não forem identificados nesta etapa não serão analisados nas etapas posteriores (ABNT, 2009).

A etapa subsequente à identificação das possíveis falhas envolvidas consiste na análise das consequências, incluindo-se o exame de reações em cadeia provocadas por consequências específicas e seus efeitos cumulativos e em cascata (ABNT, 2009). Esta análise costuma englobar os efeitos da falha da estrutura sobre o vale de jusante, os impactos econômicos, sociais e ambientais provocados pela passagem da onda de cheia e as perdas de receita devido à paralisação da geração em usinas hidrelétricas, podendo ainda ser mais abrangente, sendo particular a cada empreendimento.

As informações colhidas durante esta etapa darão subsídio à etapa de análise do risco.

- **Análise do Risco**

A análise do risco consiste na utilização da informação disponível para estimar o risco decorrente das ameaças identificadas no item anterior, dispondo-se, para tanto, de diferentes ferramentas de ordem qualitativa e quantitativa (Melo, 2014). Uma componente importante da análise de risco é que ela pode ser decomposta em mecanismos menores, facilitando sua compreensão. O processo de decomposição envolve (ICOLD, 2005):

- Separação do sistema em partes componentes e funções;
- Identificação dos mecanismos de falha;
- Análise de cada mecanismo de falha isoladamente; e
- Combinação dos resultados obtidos nos mecanismos de falha isoladamente de acordo com princípios estatísticos.

Deste modo, esta abordagem permite a promoção de um conhecimento privilegiado acerca dos mecanismos de falha, apresentado, por um lado, a análise do desempenho da estrutura frente a determinados eventos e, por outro, a localização e as medidas mais eficientes para mitigação, prevenção e detecção de riscos (Pimenta, 2009).

Segundo a norma australiana, AS/NZS (2004), tão importante quanto obter um valor numérico é o fato de a análise de risco proporcionar ao avaliador o aprimoramento do entendimento sobre o risco, permitindo que, durante o processo de tomada de decisão,

não seja apenas decidido se o risco deve ou não ser tratado, mas também a forma mais apropriada, com uma estratégia tal que permita obter a melhor relação custo-eficiência.

Os métodos de análise podem ser classificados em métodos quantitativos e métodos qualitativos. No primeiro, são utilizados valores numéricos para quantificação das consequências relacionadas a cada modo de ruptura e suas probabilidades por meio de modelos probabilísticos e construções lógicas de eventos, enquanto que, no segundo, são utilizadas escalas de ordenação ou formas descritivas para representação das probabilidades de falha e consequências, baseados em experiência técnica e emprego de índices de risco. Alguns autores citam ainda os métodos semiquantitativos, os quais se utilizam, geralmente, de descritores verbais para transformações numéricas de valores de probabilidade atribuídos (Melo, 2014).

A escolha entre utilização de um modelo quantitativo ou qualitativo não segue uma regra geral e deve ser avaliada para cada caso. Melo (2014) cita que ambas as análises (qualitativa e quantitativa) apresentam limitações: enquanto os métodos qualitativos tendem a ser subjetivos, os métodos quantitativos apresentam aplicação restrita a barragens, dado ao elevado número de incertezas envolvidas no processo. Muitos dos modelos existentes foram elaborados para aplicação em outros segmentos do mercado, tendo sido seu uso adaptado para o setor de barragens. Portanto, cabe ao responsável avaliar os benefícios e as limitações de cada modelo, bem como sua usabilidade em demais empreendimentos, para proceder pela escolha do método mais representativo.

Melo & Fusaro (2015) apresentam uma série de métodos de análise de risco de diferentes naturezas, estando estes apresentados a seguir:

- Métodos Qualitativos:
 - Métodos Baseados em Índices (Índice Global de Risco, Índice de Lafitte, Matrizes de Classificação da CNRH, Metodologia SABESP, Metodologia CEMIG);
 - Análise de Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA/FMECA);
 - Diagramas de Localização, Causa e Efeito (LCI).
- Métodos Quantitativos:
 - Árvore de Eventos (ETA);
 - Árvore de Falhas (FTA).

Dentre as metodologias apresentadas, optou-se pela utilização da metodologia FMEA/FMECA para a análise de risco no presente trabalho, conforme será abordado mais adiante.

- Avaliação (ou Apreciação) do Risco

A etapa de avaliação ou apreciação do risco consiste, por fim, na aplicação dos critérios de aceitabilidade e tolerabilidade sobre os resultados das análises de risco realizadas na

etapa anterior. É nesta etapa, portanto, que são formulados os critérios técnicos que auxiliam na definição das ações de segurança a serem tomadas.

Os critérios de tolerabilidade de risco discutidos no item “As Barragens e a Percepção do Risco” são retomados nesta etapa. A avaliação da necessidade de medidas preventivas ou corretivas depende da região do gráfico em que a classificação do risco da estrutura se encontra, devendo-se, de um modo geral, proceder-se com medidas corretivas sempre que esta estiver localizada acima da linha de ALARP. Porém, por tratar-se de um critério que vai além das premissas técnicas utilizadas em engenharia de barragens, aproximando-se de enfoques muito mais subjetivos que abrangem interesses políticos, ambientais, sociais, econômicos e legais, esta etapa figura como um dos temas mais polêmicos de todo o processo de gestão de risco (Melo, 2014).

É usual, nesta etapa, a utilização das curvas F-N anteriormente apresentadas para avaliação do risco societal, aonde são plotados os resultados da probabilidade anual de falha da estrutura com número de vítimas maior que “N”, no eixo das ordenadas, e do número de fatalidades (N) dada a ocorrência da ruptura, no eixo das abscissas, avaliando-se, então, se a estrutura encontra-se abaixo ou acima dos limites de aceitabilidade e tolerabilidade (Melo, 2014). Geralmente, a adoção deste critério leva a probabilidades de falha da ordem de 10^{-4} ou 10^{-5} , para um número de 10 fatalidades. Esta análise vem sendo amplamente utilizada para apreciação de riscos em diversos países, contudo, sua aplicação limita-se a métodos de análise de risco quantitativas.

Para aplicação com modelos de análise de risco qualitativas (ou semiquantitativas), Pimenta (2009) cita que os critérios mais usuais de classificação consistem em matrizes de risco, elaboradas com base na definição de diferentes classes de probabilidade de ocorrência e de consequências, utilizando-se de descritores verbais para sua classificação. A utilização de um sistema de cores permite definir as fronteiras entre os limites de aceitabilidade e tolerabilidade dos riscos, conforme exemplo apresentado na Figura 2.4. Os limites e classes definidos representam um exemplo de classificação, sendo possível realizar adequações da matriz a um conjunto de empreendimentos em análise, assimilando as particularidades envolvidas.

PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA	MUITO ELEVADA	3	4	4	5	5
	ELEVADA	2	3	4	4	5
	MODERADA	2	2	3	4	4
	BAIXA	1	2	2	3	4
	POUCO PROVÁVEL	1	1	2	2	3
		MUITO BAIXAS	BAIXAS	MODERADAS	ELEVADAS	MUITO ELEVADAS
		CONSEQUÊNCIAS				

Classes de risco

Risco intolerável

Risco tolerável

Risco aceitável

Figura 2.4 – Exemplo de matriz de risco com 5 classes (fonte: Pimenta, 2009 apud. Melo, 2014).

Neste trabalho, foram utilizados os índices de severidade e de ocorrência obtidos do modelo de análise de risco FMEA/FMECA para classificação na matriz de risco, conforme será tratado no item “O Modelo FMEA/FMECA”.

2.2.2 - Controle de Riscos

O controle de riscos é definido por Pimenta (2009) como a etapa que engloba as atividades relacionadas a tomada de decisão, mitigação, prevenção, detecção, planejamento de emergência, revisão e comunicação dos riscos. Portanto, esta etapa deve contemplar tanto as ações internas realizadas para detectar, prevenir e mitigar a ocorrência de mecanismos de falha indesejados, bem como as ações integradas às comunidades e órgãos de defesa civil, articulando-se para a comunicação, planejamento e coordenação de ações emergenciais no caso da ocorrência da ruptura.

Na ISO 31.000 (ABNT, 2009), é dada a nomenclatura de “Tratamento de Riscos” a esta etapa e consiste, conforme definição indicada nesta, na “seleção de uma ou mais opções para modificar os riscos e a implementação dessas opções”. Esta etapa é um processo cíclico e envolve as seguintes atividades: (i) avaliação dos tratamentos de riscos já realizados; (ii) tomada de decisão quanto a tolerabilidade dos riscos residuais; (iii) definição e implementação de tratamento dos riscos não-toleráveis; e (iv) avaliação da eficácia do tratamento.

As principais ações descritas por Pimenta (2009) estão relacionadas a seguir:

- A **tomada de decisão** ocorre após a avaliação/ apreciação do risco, aonde deve decidir-se pela tolerabilidade dos riscos ou pela redução destes através de medidas de segurança. Ao optar-se pela execução de medidas para redução, vê-se a necessidade de critérios técnicos que justifiquem qual o custo-benefício da

implementação das medidas propostas. Alguns autores propõem metodologias para estabelecimento do custo ótimo das medidas de mitigação, baseados em PIB per capita, expectativa de vida e proporção de tempo gasto em atividades econômicas da população atingida, dentre outros critérios, sendo realizada uma abordagem pautada em critérios econômicos, sem entrar em discussões ideológicas acerca do valor agregado a uma vida humana. ANCOLD (1994) apud Pimenta (2009) considerava justificados investimentos da ordem de 1,5 a 1,8 milhões de euros (preço de 2007) para poupar uma fatalidade;

- A **mitigação** dos riscos trata, geralmente, de medidas tomadas para redução das ações desestabilizadoras ou para o aumento das componentes resistentes. Exemplos destas atividades são a redução da cota máxima de operação do lago, reduzindo assim as cargas hidrostáticas sobre a estrutura, e a adoção de medidas estruturais tais como bermas estabilizadoras, que atuam no aumento dos esforços resistentes;
- A **prevenção** diz respeito a medidas adotadas ainda na fase de projeto, como o zoneamento de áreas de risco no vale de jusante e zonas afetadas pela barragem, para impedir sua ocupação;
- A **deteção** está relacionada às inspeções e monitoramento dos componentes da barragem por meio da instalação de instrumentação para acompanhamento dos fenômenos dos quais se tem interesse. Conforme apontado por Penna, Aragão & Fusaro (2015), as inspeções visuais permitem aos responsáveis legais pela barragem identificar anomalias e deteriorações de forma rápida, não sendo uma ferramenta de avaliação de risco, mas sim de interpretação do comportamento das barragens;
- O **plano de emergência**, o qual tem por objetivo coordenar as ações no caso da ocorrência de acidentes;
- A **revisão** periódica dos riscos, de modo a implementar um processo cíclico de melhorias; e, por fim,
- A **comunicação** à população e aos órgãos responsáveis, visando a abordagem de uma nova perspectiva de sociedade orientada para o risco.

2.3 - O Modelo FMEA/FMECA

O modelo de Análise do Modo e Efeito de Falha (Failure Mode and Effect Analysis - FMEA) foi originalmente desenvolvido em 1949 pelo exército norte-americano para auxiliar na análise dos modos de falha presentes em diferentes etapas de processos e identificar seus efeitos sobre a segurança e a confiabilidade do sistema analisado, com base nas diretrizes estabelecidas no documento *Military Standard Mil-STD-1629 – Procedures for performing a Failure mode, Effect and Criticality Analysis (DoD, 1980)*. Desde seu desenvolvimento, a ferramenta vem sendo aplicada para a etapa de análise de risco e modos de falha em diversos setores da indústria, com destaque às indústrias aeronáutica, química, petrolífera, nuclear e automobilística (Vianna, 2015).

Sua aplicação na engenharia de barragens restringia-se, a algumas décadas, à análise de riscos em barragens de contenção de rejeitos. Entretanto, desde a promulgação da Lei 12.334/2010, foi possível notar um crescente aumento no debate acerca da utilização de ferramentas de análise de risco na gestão de barragens de geração elétrica, fato corroborado pelo elevado número de simpósios e eventos promovidos para estimular o debate acerca da segurança de barragens, bem como o crescente número de divulgação de documentos técnicos nesta área de atuação, aonde pode-se citar os recentes trabalhos de Melo (2014) e Vianna (2015).

Conforme discutido no item anterior, o modelo FMEA trata-se de uma ferramenta de análise de risco qualitativa, podendo ser considerada uma análise semiquantitativa quando houver a incorporação da criticidade no sistema, por intermédio da adoção de índices de escala de ocorrência e de severidade, passando a denominar-se “Análise dos Modos de Falha, Efeito e Criticidade (FMECA)”. De forma simplificada neste trabalho, a metodologia FMEA/FMECA será referida simplesmente como FMEA.

O principal objetivo da aplicação deste método é o “conhecimento estruturado do sistema em análise, através da compreensão do impacto, na segurança e na funcionalidade do sistema, dos modos de falha plausíveis, designadamente de suas causas, efeitos e consequências, e da antecipação de medidas de prevenção, detecção e mitigação diversas” (Pimenta, 2009).

A primeira etapa da aplicação do método consiste na compreensão de todos os componentes envolvidos na análise e na decomposição hierárquica em sistemas e subsistemas afins. Em suma, Melo & Fusaro (2015) orientam que a escolha do nível de corte do sistema seja feita com base nos resultados esperados e na disponibilidade de informações de projeto, não sendo recomendada a discriminação em elementos inferiores nos casos em que não se dispuserem de informações suficientes para uma análise menos subjetiva dos mecanismos envolvidos.

De um modo geral, os principais procedimentos para aplicação do método a barragens podem ser sintetizados pelos seguintes itens (adaptado de Pimenta, 2009):

1. Identificação dos sistemas e subsistemas em análise;
2. Decomposição hierárquica dos sistemas e subsistemas;
3. Caracterização das funções e identificação dos modos de falha;
4. Identificação das possíveis causas que podem levar a cada modo de falha;
5. Identificação dos efeitos ou consequências do modo de falha, avaliando-se seu impacto sobre os sistemas de nível superior e sua probabilidade de ocorrência;
6. Identificação das medidas de controle de risco (prevenção, detecção e mitigação);

Os elementos citados no item 5 são incorporados ao modelo somente na análise semiquantitativa (FMECA). A ponderação destes parâmetros é dada segundo a classificação dos índices listados a seguir:

- Índice de ocorrência (O) – trata da probabilidade de ocorrência da falha, podendo ser balizada segundo um descritor verbal (provável, muito provável, dentre outros.) ou por meio de uma probabilidade de falha;
- Índice de severidade (S) – trata da gravidade dos efeitos finais devido a ocorrência da falha; e
- Índice de detecção (D) – trata da facilidade de detecção das manifestações da falha.

A avaliação dos índices por classe e escalas numéricas é feita de acordo com critérios previamente definidos, sendo recomendada a adaptação dos critérios à realidade específica de cada empreendimento (Vianna, 2015). No entanto, pode-se dispor de tabelas elaboradas por diversos autores e de uso reconhecido, principalmente no setor de mineração, campo no qual este tipo de análise já se encontra em desenvolvimento a mais tempo.

Melo & Fusaro (2015) citam duas formas de priorização ou ordenação dos modos de falha: (i) pela adoção do índice de criticidade, expresso pelo produto da ocorrência e severidade ($Crit. = O \times S$) ou (ii) pela adoção do Número de Prioridade de Risco (NPR), expresso pelo produto da ocorrência, severidade e detecção ($NPR = O \times S \times D$). No primeiro caso é mais usual a representação por matrizes bidimensionais, gerando a matriz de risco ou criticidade, conforme abordado no subitem “Avaliação de Risco”. Neste caso, é usual que cada modo de falha seja plotado nas células da matriz de risco, por meio de seu número de identificação, conforme exemplo apresentado na Figura 2.5.

Ocorrência	V					
	IV					
	III			1.2 (1) 1.2.1 (1)		
	II				1 (3), 1.2 (3), 2(3), 2(5), 2.4(3), 2.4(5)	1(2), 1.2 (1), 1.6(1), 1.6.1(1), 1.6.2(1), 1.6.3(1), 2(1), 2.4(1)
	I					
		I	II	III	IV	V
		Severidade				

Figura 2.5 - Matriz de risco para elementos críticos da barragem de Três Marias (fonte: Melo, 2014).

A classificação por meio do RPN não permite a visualização com base na probabilidade (ocorrência) e na consequência (severidade), no entanto, leva em consideração o fator

relativo à facilidade de detecção (Melo & Fusaro, 2015). De acordo com Portes (2013, apud Melo & Fusaro, 2015), a inclusão do índice de detecção é importante, na medida em que alguns mecanismos deflagradores das falhas podem não demonstrar manifestações claras.

A Figura 2.6 apresenta parte do modelo FMEA elaborado para o sistema de barragem Três Marias (CEMIG), conforme apresentado por Melo (2014).

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA		O	CRIT	CONTROLE		TIPO CONTROLE	D	NPR
1 Barragem de terra												
Conter o reservatório	1 (1) Galgamento (falhas hidráulicas)	Erosão externa com formação de brecha	10	VI	Níveis de água excepcionais	1	I	10	Deplecionamento do reservatório e manutenção de borda livre	Prevenção	1	10
									Monitoramento dos níveis por sistema de telemetria	Deteção		
	1 (2) Movimento de massa	Instabilidade global com liberação descontrolada de água	10	VI	Carregamentos excepcionais	3	II	30	Construção de bermas estabilizadoras	Prevenção	4	120
									Deplecionamento do reservatório	Prevenção		
					Propriedades inadequadas dos materiais	1	I	10	Inspeção visual e instrumentação	Deteção	4	40
									Construção de bermas estabilizadoras	Prevenção		
									Recompactação	Prevenção		
									Deplecionamento do reservatório	Prevenção		
	1 (3) Erosão interna	Piping com formação de brecha	9	V	Falha de projeto ou construção	3	II	27	Inspeção visual e instrumentação	Deteção	2	54
									Diminuição da carga hidráulica (deplecionamento do reservatório)	Prevenção		
Lançamento de materiais de filtro e dreno									Prevenção			
1.1 Crista												
Permitir acesso à barragem	1.1 (1) Obstrução do acesso	Impossibilidade de execução de inspeções	1	I	Excesso de deformações	1	I	1	Reconstrução e recompactação	Prevenção	1	1
									Inspeção visual	Deteção		
Garantir a borda livre da barragem	1.1 (2) Deformação excessiva	Galgamento com erosão externa	10	VI	Recalques (inadequação de projeto ou construção)	1	I	10	Alteamento da crista	Prevenção	1	10
									Inspeção visual e monitoramento por campanhas topográficas	Deteção		

Figura 2.6 – Exemplo de layout da planilha FMEA/FMECA (fonte: Melo, 2014)

2.4 - Os Modos de Falha em Barragens

O termo “modo de falha” associado a uma barragem é definido, conforme Dam Failure Statistical Analysis – Bulletin 99 (ICOLD, 1995), como o colapso ou o movimento de parte da barragem ou de sua fundação, implicando na incapacidade em manter o reservatório confinado e resultando, em geral, na liberação descontrolada de uma grande quantidade de água, com aumento do risco às comunidades e propriedades do vale de jusante.

No relatório mencionado, foram reunidos dados de acidentes históricos com barragens construídas em diversos materiais, comparando-se dados técnicos com o modo de falha desenvolvido. Algumas conclusões importantes definidas neste relatório estão sintetizadas a seguir:

- O percentual de falhas de barragens vem diminuindo nas últimas 4 décadas;
- Em termos absolutos, a maior parte dos acidentes envolveu pequenas barragens, as quais representaram a maior parcela dos empreendimentos em operação;
- A maior parte das falhas ocorreu nos primeiros 10 anos de operação;
- Problemas relacionados à fundação foram a maior causa da ruptura de barragens de concreto;

- A causa mais comum de falha em barragens de terra e enrocamento foi o galgamento, seguido de erosão interna no corpo da barragem e erosão interna na fundação.

Em suma, para barragens de concreto, conforme apresentado na Figura 2.7, os problemas na fundação (erosão interna e cisalhamento) foram a causa primária mais frequente de falha das estruturas. Ademais, o galgamento também figurou como um modo de falha importante, em muitos casos ocasionado pela incapacidade do vertedouro em descarregar cheias afluentes.

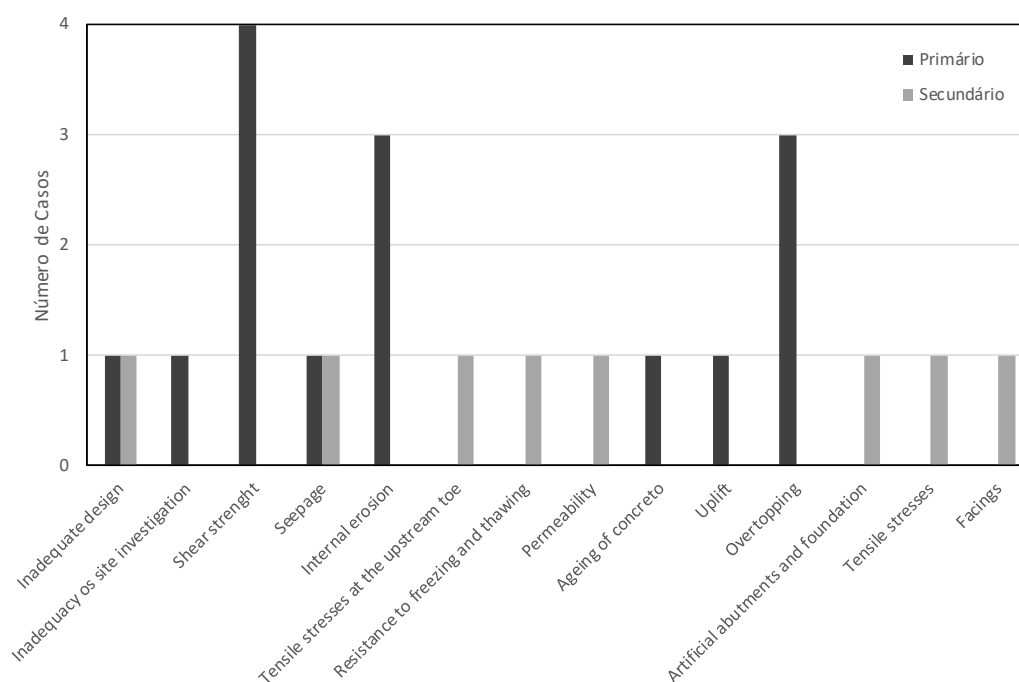


Figura 2.7 - Casos históricos de ruptura de barragens de concreto (fonte: ICOLD, 1995).

As barragens ou estruturas de concreto a gravidade são estruturas rígidas que se utilizam do carregamento do peso próprio para resistir aos esforços desestabilizantes. Por este motivo, este tipo de estrutura é muito mais vulnerável à falhas na fundação devido a ocorrência de planos de fratura que causem o deslocamento rápido da estrutura, ocasionando sua ruptura com liberação instantânea de água.

O manual de Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas (Eletrobrás, 2003) apresenta as seguintes análises para verificação da estabilidade global de barragens de concreto:

- deslizamento em planos de fragilidade (na estrutura, fundação ou interface concreto-fundação);
- tombamento;
- flutuação;

- tensões na base da fundação e na estrutura;
- estabilidade elástica (flambagem);
- deformações e recalques;
- vibrações.

Portanto, as causas relacionadas aos modos de falha por instabilidade global podem ser de diversas naturezas, contanto que incorram no aumento dos esforços solicitantes (força hidrostática, empuxo, sismo, etc) ou na redução dos esforços resistentes (perda de peso na barragem ou alívio do peso devido a subpressão elevada, dentre outros).

Além da falha por instabilidade global, as estruturas de concreto estão sujeitas, ainda, ao fenômeno de erosão interna na fundação devido ao aumento da poropressão com consequente carreamento de partículas da fundação.

Em barragens de terra, conforme sintetizado na Figura 2.8, o galgamento foi a causa mais frequente de falha das estruturas, seguido de erosão interna no corpo do maciço e erosão interna na fundação (ICOLD, 1995). Neste caso, também estão associadas outras condicionantes que ocasionaram a falha da estrutura.

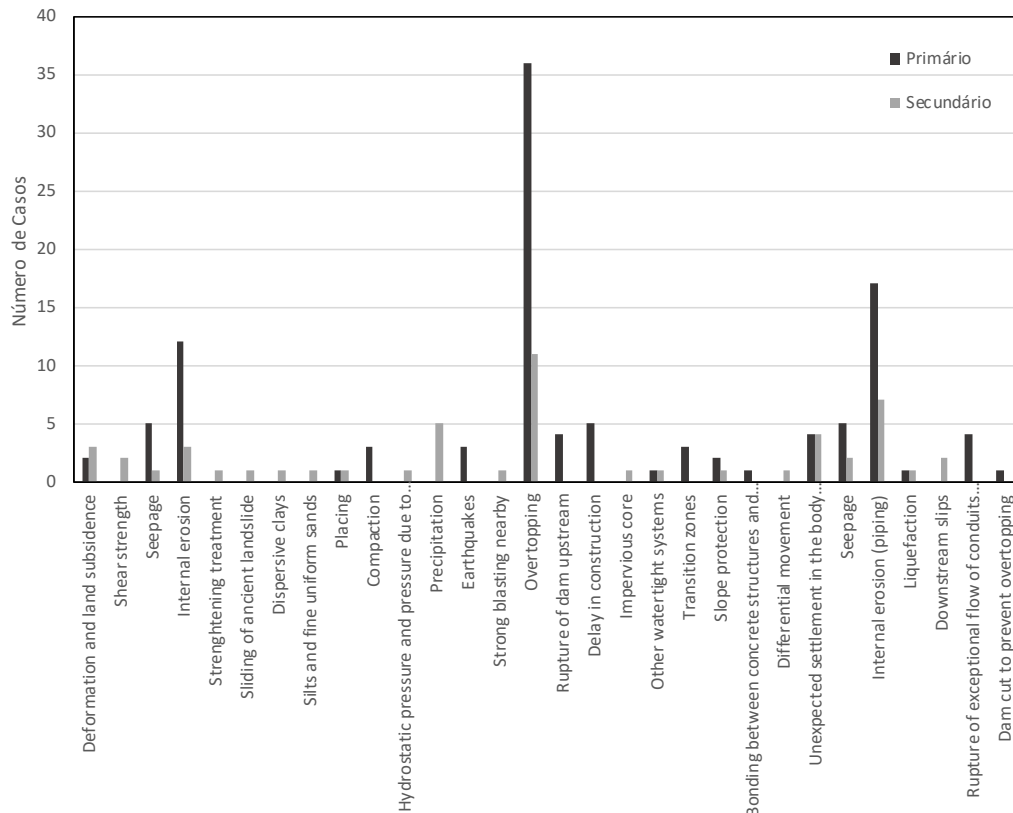


Figura 2.8 - Casos históricos de ruptura de barragens de terra (fonte: ICOLD, 1995).

As barragens de terra representam o tipo mais comum de estrutura adotada, dado seu baixo custo fruto da utilização de materiais naturais disponíveis localmente e pela tolerabilidade de fundações menos resistentes para apoio da estrutura. Suas seções são compostas geralmente de material natural argiloso, garantindo a baixa permeabilidade da estrutura (Melo, 2014). A condução das águas percoladas pelo aterro é feita geralmente pela execução de filtros verticais e horizontais com materiais de maior permeabilidade (adota-se areia) para redução das poropressões no maciço.

Os principais modos de falha neste tipo de estrutura foram relacionados por Lafitte (1993 citado por Hartford e Baecher, 2004): conforme sintetizado a seguir:

- **Falhas hidráulicas devido a níveis excepcionais:** inclui galgamento da barragem e todos os mecanismos ligados a esta falha, como capacidade insuficiente do vertedouro, erosão do talude de jusante, falha na operação do vertedouro, etc.;
- **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 em galgamento; e
- **Erosão interna:** inclui, entre outros, desenvolvimento de piping no núcleo da barragem e erosão de solos de fundação ou juntas (preenchimento de descontinuidades).

As principais causas de erosão interna com formação de piping foram descritas por Foster (1999) apud Vianna (2015), conforme relacionado a seguir:

- Erosão regressiva iniciada no talude de jusante: o fluxo atingindo a face de jusante causa o carreamento de partículas da superfície, iniciando uma erosão que progride para montante até atingir o reservatório (Figura 2.9);

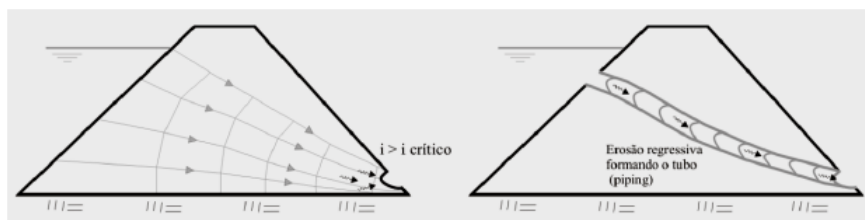


Figura 2.9 – Piping por erosão regressiva (fonte: Foster, 1999 apud Vianna, 2015)

- Erosão regressiva devido a trincas internas no aterro: trincas devido ao alívio de tensões no corpo do aterro podem ocasionar erosão em seu entorno, ocorrendo na formação de um fluxo concentrado que aumenta o poder de carreamento de finos da estrutura, evoluindo para um piping (Figura 2.10);

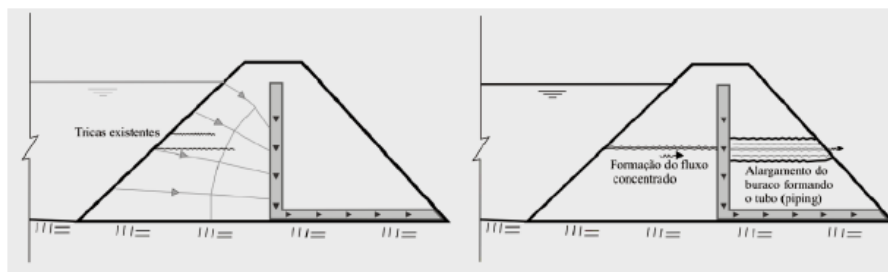


Figura 2.10 – Erosão devido a trincas internas no aterro (fonte: Foster, 1999 apud Vianna, 2015)

- (iii) Erosão devido ao carreamento de finos: ocorre pelo carreamento de partículas do corpo do aterro devido a falhas na compactação ou na escolha da curva granulométrica do material, evoluindo para um piping.

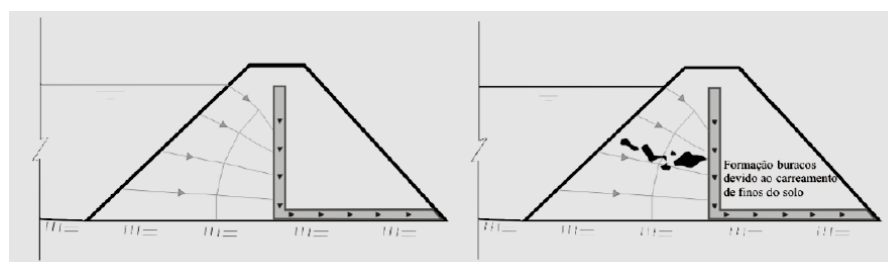


Figura 2.11 – Erosão devido ao carreamento de fino (fonte: Foster, 1999 apud Vianna, 2015)

3 - Resultados e Discussão

3.1 - Descrição do Empreendimento

O barramento em análise é parte integrante de um empreendimento destinado à geração hidrelétrica com capacidade instalada de 807,5 MW e energia assegurada de 217,5 MW, distribuída em 5 unidades geradoras. A usina conta ainda com uma estrutura de eclusas e um canal de ligação a outro reservatório, que possibilita a navegação pela hidrovia.

O reservatório possui área alagada de 757 km² no Nível Máximo Normal e 758 km² em seu Nível Máximo Maximorum. Os níveis operativos variam de 325,4 m (NA Mínimo Operativo) a 328,0 (NA Máximo Normal), tendo como limites inferior e superior do lago os níveis 323,0 m (NA Mínimo Normal) e 328,4 (NA Máximo Maximorum). A jusante, os níveis variam entre 279,0 m (NA Mínimo) e 284,75 m (NA Máximo Maximorum).

O eixo longitudinal sobre o qual estão concebidas as estruturas que compõem o empreendimento tem aproximadamente 3,7 km de extensão. A disposição das estruturas, no sentido do estaqueamento, está sintetizada a seguir:

- Sistema de Eclusas;

- Barragem de Terra da Margem Direita;
- Muro de Transição Direito;
- Vertedouro Controlado;
- Tomada D'água e Casa de Força;
- Barragem de Gravidade;
- Muro de Transição Esquerdo;
- Barragem de Terra da Margem Esquerda.

Além das estruturas listadas anteriormente, o empreendimento conta ainda com um lago intermediário entre os sistemas de eclusa, confinado pela execução de um dique intermediário.

A estruturação dos principais sistemas contemplados neste trabalho está apresentada a seguir e devidamente identificada na Figura 3.1. Neste trabalho, optou-se pela exclusão das estruturas das eclusas e demais componentes relacionados, uma vez que sua configuração complexa exigiria uma análise muito aprofundada dos riscos envolvidos, tirando o foco da análise da eficiência da utilização da metodologia na tomada de decisão, objetivo principal deste trabalho.

1. Barragem de Terra – Margem Esquerda;
 - 1.1. Seção E;
 - 1.2. Seção F;
2. Barragem de Terra – Margem Direita;
 - 2.1. Seção B;
 - 2.2. Seção C;
 - 2.3. Seção D;
3. Casa de Força;
4. Vertedouro Controlado;
5. Muro de Transição (Margem Esquerda e Margem Direita);
6. Barragem de Gravidade.

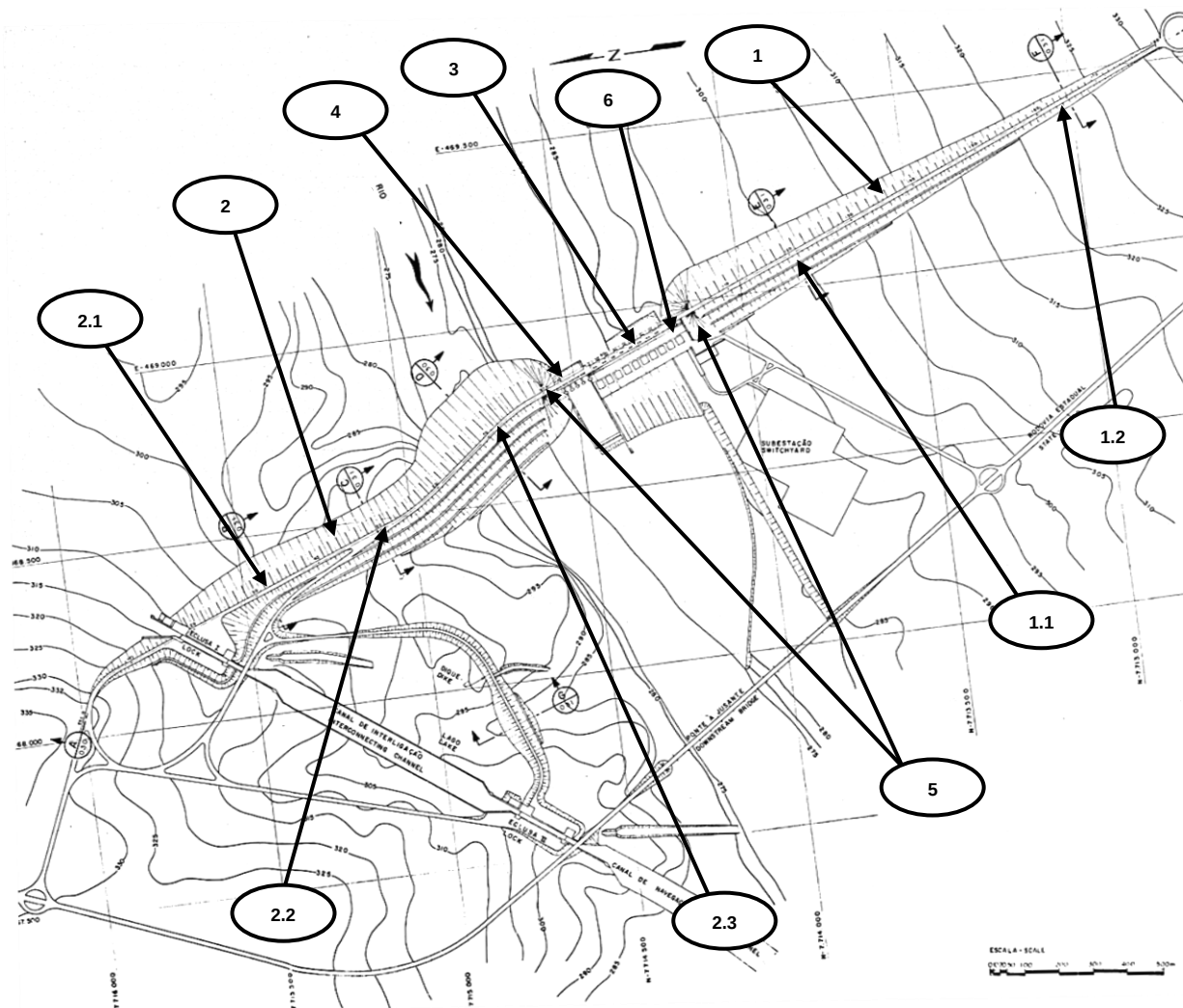


Figura 3.1 – Arranjo geral do empreendimento.

Os sistemas contemplados nesta primeira análise serão posteriormente decompostos em subsistemas para aplicação do método FMEA, facilitando a análise dos modos de falha envolvidos em cada estrutura. A seguir, estão relacionadas as principais características técnicas de cada estrutura.

3.1.1 - Fundação

A geologia da área do empreendimento se caracteriza por uma sucessão de derrames basálticos sub-horizontais, podendo-se individualizar três zonas distintas: a basal, constituída essencialmente de basalto denso; a intermediária, de textura vesicular amigdalóide; e a superior, composta por camadas de brecha basáltica. O material da linha de fundação das estruturas varia de acordo com a localização das estruturas, sendo

compostos, principalmente, por basalto denso, solos de alteração de basalto, brechas basálticas arenosas, solos de alteração de brecha e basaltos vesículo amigdaloidais.

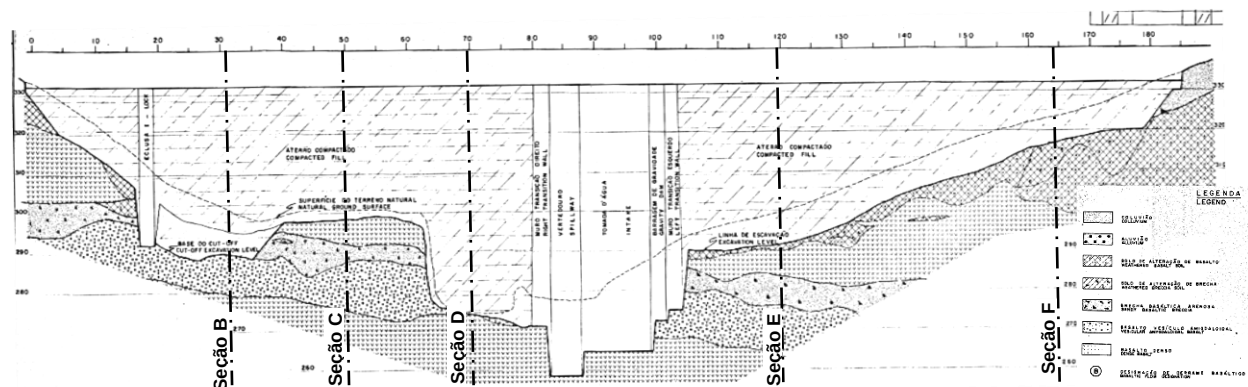


Figura 3.2 – Perfil longitudinal da implantação das estruturas do empreendimento.

Uma característica importante relacionada à fundação das estruturas de concreto do empreendimento diz respeito à identificação da ocorrência de uma brecha basáltica no ponto de contato entre derrames, próximo à elevação 240 m. A brecha identificada apresentou alta permeabilidade associada a um elevado nível de artesianismo, tendo condicionado a execução de um sistema de injeções profundas aliadas a uma cortina de drenagem cercando todas as estruturas de concreto.

3.1.2 - Barragem de Terra – Margem Esquerda

A barragem de terra da ME estende-se desde o muro de transição esquerdo, aproximadamente na estaca 104, até seu fechamento na ombreira esquerda, aproximadamente na estaca 185, perfazendo cerca de 1600 metros de extensão. A seção típica da barragem de terra na margem esquerda apresenta coroamento na elevação 332,0 m, com largura de crista de 10,0 m e altura variável, apresentando cerca de 40,0 m em sua maior seção. O corpo do aterro foi concebido com material homogêneo compactado, com espaldares de montante de 1,0 V : 2,7 H e espaldares de jusante de 1,0 V : 2,0 H. O sistema de drenagem interna é composto de filtro vertical com largura de 1,0 m em sua parte mais alta e 1,5 m próximo à base do aterro, e filtro horizontal tipo sanduíche, com espessura total de 1,50 m, que tem por função conduzir as águas provenientes do aterro e da fundação até os drenos.

No espaldar de montante, foi concebida uma proteção em enrocamento do tipo “rip-rap” desde a elevação 318,0 m até a crista do barramento, de modo a absorver os efeitos erosivos causados por ondas e pelo deplecionamento do reservatório até sua cota mínima de projeto. Abaixo desta cota, a face de montante foi protegida pelo lançamento de enrocamento não selecionado. No espaldar de jusante, foram previstas bermas de 4,0 m de largura dotadas de canaletas de drenagem, concebidas com diferença de elevação de 12,0 m entre patamares, de modo a reduzir a ação erosiva do escoamento pluvial sobre o talude. A proteção da face de jusante foi realizada por revestimento gramíneo, evitando a

desagregação superficial pelo impacto da precipitação. No pé do aterro de jusante, foi procedido com o reaterro do corte realizado para implantação do empreendimento, para recomposição do terreno natural.

O material coluvionar da fundação foi completamente removido para a implantação da estrutura, permanecendo esta apoiada sobre horizontes de solo de alteração de basalto, basalto denso, brecha basáltica arenosa e basalto vesículo amigdaloidal. Na seção mais alta, procedeu-se pela execução de um cut-off interceptando o solo de alteração de basalto e adentrando na camada de basalto denso, executando-se ainda a compactação da superfície da fundação com rolo pneumático nos locais onde o barramento apoiou-se diretamente no solo de alteração.

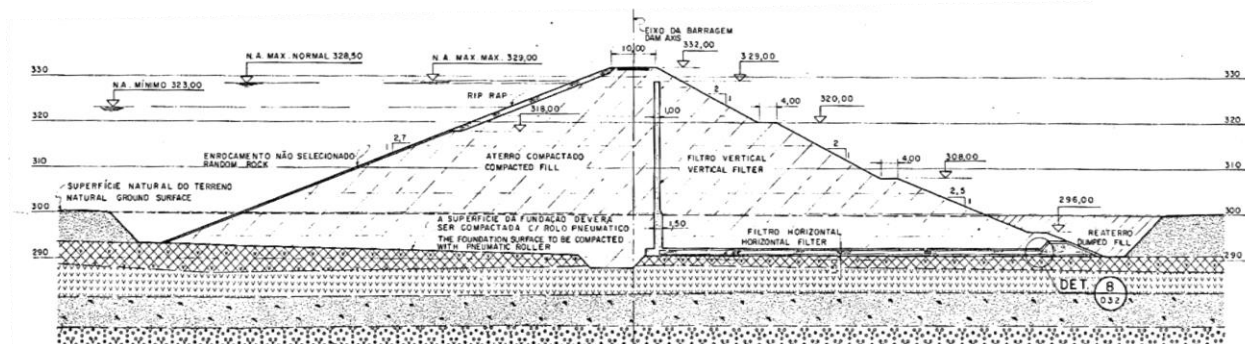


Figura 3.3 – Seção principal da barragem de terra da margem esquerda (Seção ‘E’).

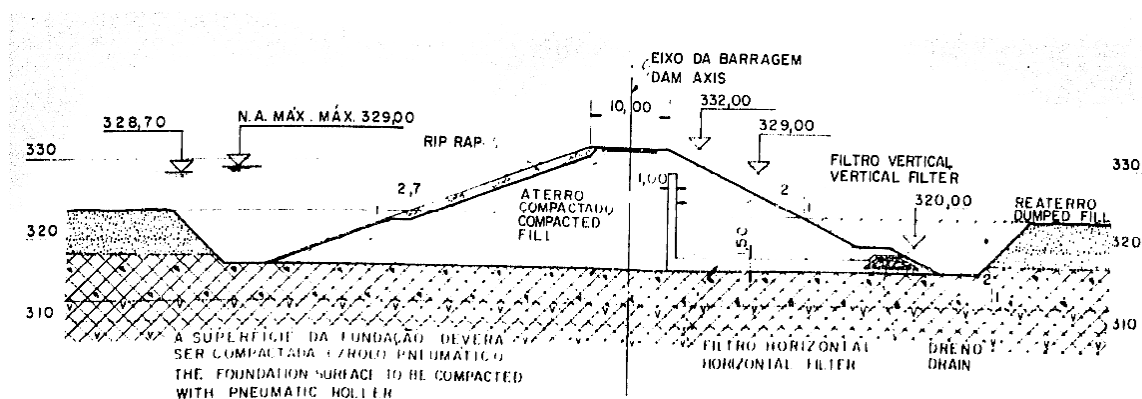


Figura 3.4 – Seção principal da barragem de terra da margem esquerda (Seção ‘F’).

Todas as seções típicas da barragem de terra da margem esquerda foram instrumentadas com piezômetros no filtro e nas camadas da fundação, medidores de nível d'água no aterro a jusante do filtro vertical e medidores de recalque no eixo.

3.1.3 - Barragem de Terra – Margem Direita

A barragem de terra da MD estende-se desde o fechamento na ombreira direita (estaca 0) até o encosto no muro de transição direito, aproximadamente na estaca 80, perfazendo também cerca de 1600 metros de extensão, aonde foi concebida, próximo à estaca 18, a

entrada da Eclusa I. Parte do alinhamento da barragem da margem direita foi concebido sobre o leito do rio, apresentando topografia bastante variável, motivo pelo qual diferentes soluções foram adotadas para as seções características da estrutura.

Na seção implantada sobre o leito natural (Seção “D”), a barragem de terra apresenta coroamento na elevação 332,0 m, com largura de crista de 10,0 m e altura aproximada de 60,0 m. O corpo do aterro foi concebido com material homogêneo compactado, com espaldares de montante de 1,0 V : 2,7 H e espaldares de jusante de 1,0 V : 2,0 H. O sistema de drenagem interna é composto de filtro vertical com largura de 1,0 m em sua parte mais alta e 1,5 m próximo à base do aterro, e filtro horizontal tipo sanduíche, com espessura total de 1,2 m. A seção ainda conta com um enrocamento de pé, concebido com coroamento na cota 286,0 m. A fundação é constituída de basalto denso, tendo sido prevista apenas limpeza, lavagem, remoção de blocos e aplicação de “slush grouting”.

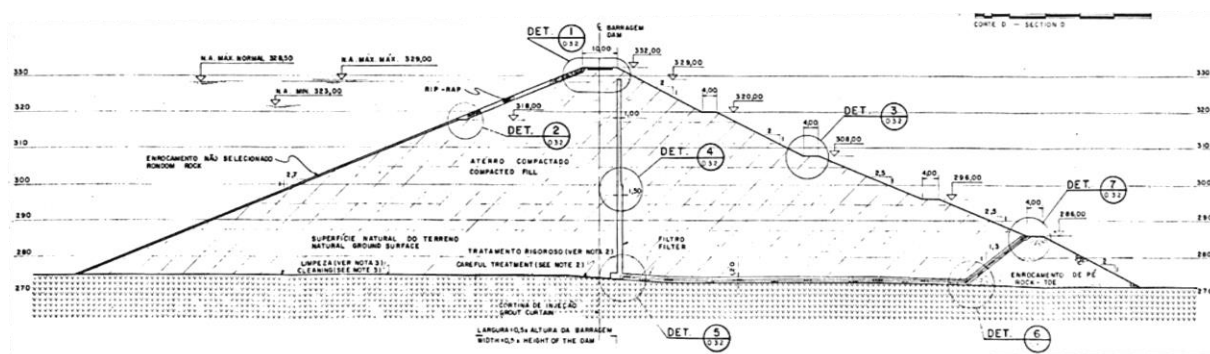


Figura 3.5 – Seção da barragem MD no leito natural (Seção “D”).

Na seção implantada sobre a margem direita (Seção “C”), a barragem de terra apresenta coroamento na elevação 332,0 m, com largura de crista de 10,0 m e altura aproximada de 35,0 m. O corpo do aterro foi concebido com material homogêneo compactado, com espaldares de montante de 1,0 V : 2,7 H e espaldares de jusante de 1,0 V : 2,0 H. O sistema de drenagem interna é composto de filtro vertical com largura de 1,0 m e filtro horizontal com espessura total de 1,2 m, com objetivo de conduzir as águas ao dreno de pé. A fundação está apoiada sobre horizontes de basalto denso, brecha basáltica arenosa e basalto vesículo amigdaloidal, tendo sido concebido apenas um pequeno cut-off. No pé do aterro de jusante, foi procedido com o reaterro do corte realizado para implantação do empreendimento, para recomposição do terreno natural.

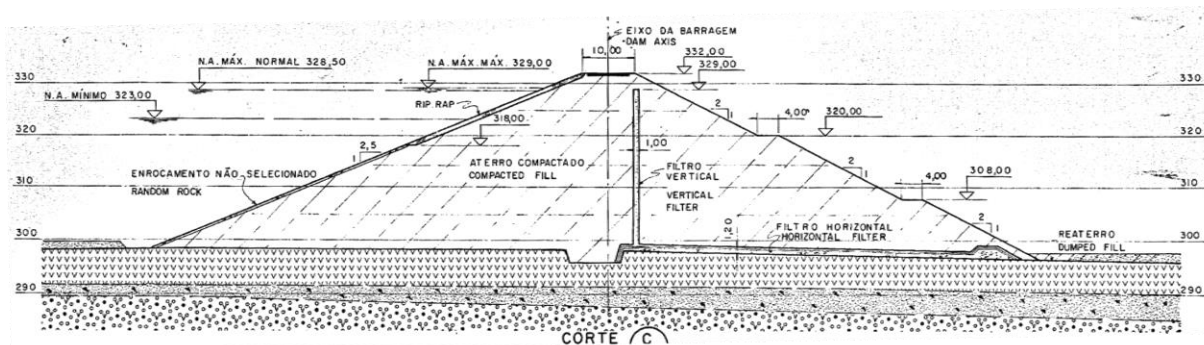


Figura 3.6 - Seção da barragem MD na margem direita (Seção "C").

Na seção localizada próxima à ombreira direita e à estrutura da Eclusa I (Seção "B"), a barragem de terra apresenta coroamento na elevação 332,0 m, com largura de crista de 10,0 m e altura aproximada de 37,0 m. O corpo do aterro foi concebido com material homogêneo compactado, com espaldares de montante de 1,0 V : 2,7 H e espaldares de jusante de 1,0 V : 2,0 H. O sistema de drenagem interna é composto de filtro vertical com largura de 1,0 m e filtro horizontal com espessura total de 2,0 m, com objetivo de conduzir as águas ao dreno de pé. O material coluvionar da fundação foi removido, permanecendo esta apoiada sobre horizontes de solo de alteração de basalto, basalto vesículo amigdaloidal e basalto denso, tendo-se procedido com a execução de um cut-off interceptando o solo de alteração de basalto e adentrando na camada de basalto vesículo amigdaloidal. O tratamento da superfície de contato foi feito pela compactação com rolo pneumático. O reaterro a jusante, nesta seção, apresentou volumes muito maiores de modo a permitir o desenvolvimento dos acessos às estruturas das eclusas, estando prevista uma pista de acesso na cota 314,2 m.

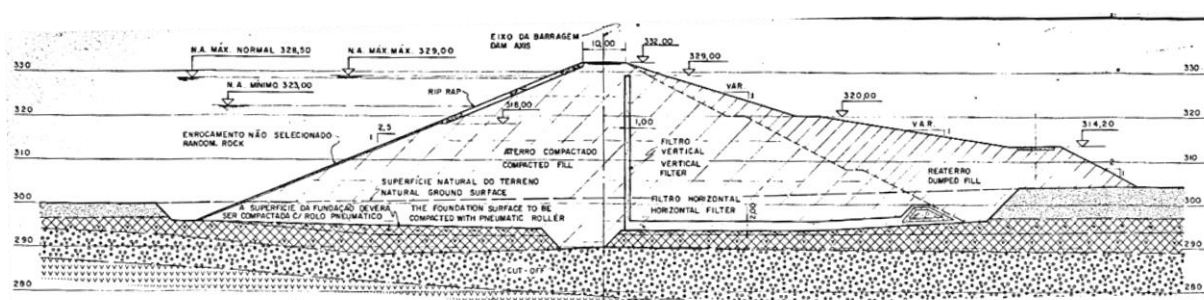


Figura 3.7 - Seção da barragem MD na margem direita (Seção "B").

Os espaldares de montante foram concebidos com uma proteção em enrocamento do tipo "rip-rap" desde a elevação 318,0 m até a crista do barramento, de modo a absorver os efeitos erosivos causados por ondas e pelo deplecionamento do reservatório até sua cota mínima de projeto. Abaixo desta cota, a face de montante foi protegida pelo lançamento de enrocamento não selecionado. No espaldar de jusante, foram previstas bermas de 4,0 m de largura dotadas de canaletas de drenagem, concebidas com diferença de elevação de 12,0 m entre patamares, de modo a reduzir a ação erosiva do escoamento pluvial

sobre o talude. A proteção da face de jusante foi realizadaa por revestimento gramíneo, evitando a desagregação superficial pelo impacto da precipitação.

Todas as seções típicas da barragem de terra da margem direita foram instrumentadas com piezômetros no filtro e nas camadas da fundação, medidores de nível d'água no aterro a jusante do filtro vertical e medidores de recalque no eixo.

3.1.4 - Vertedouro Controlado

O vertedouro da barragem é do tipo superfície controlado por comportas segmento, tendo sido concebido com 4 vãos de 15,0 m de base por 18,0 m de altura, com cota da soleira na elevação 310,5 m. A estrutura foi dimensionada para descarregar uma vazão de 9.500 m³/s, quando da operação conjunta de todos os vãos. A calha do vertedouro é composta por um perfil do tipo Creager, com inclinação do paramento de jusante de 0,8 H : 1,0 V. As juntas de dilatação foram concebidas no eixo dos vãos do vertedouro, dividindo a estrutura em blocos de aproximadamente 14,0 m. A conformação do escoamento na entrada do vertedouro dá-se pela concepção de raios de aproximação nos vãos laterais e nos pilares centrais.

O apoio dos braços da comporta segmento é feito em vigas munhão, posicionadas na elevação 316,2 m, dotadas de um sistema de ancoragem com cabos protendidos. A manutenção das comportas segmento é feita pelo lançamento de stop-log sobre as ranhuras localizadas a montante da estrutura. Acima dos vãos do vertedouro, foi concebida uma ponte com cota superior na elevação 331,0 m e muretas de proteção na cota 332,13 m, coerentes com a cota de proteção das demais estruturas.

A dissipação da energia do escoamento ao final da estrutura ocorre por meio de uma bacia de dissipação, concebida com cota de fundo na elevação 264,0 m e aproximadamente 90,0 m de comprimento, dotado ainda de um end-sill na elevação 273,0 m. Juntas de dilatação foram concebidas na bacia de dissipação em intervalos de 13,0 m a 15,0 m.

Durante a fase construtiva, foram concebidas adufas sob o vão dos vertedouros, na cota 273,5 m, para desvio do rio, as quais foram devidamente tamponadas. Abaixo da estrutura, na elevação 261,5 m, foram concebidas galerias de drenagem e injeção, auxiliando na estabilidade do conjunto. Os muros laterais foram concebidos ao longo da calha e bacia de dissipação, de modo a confinar o escoamento proveniente do vertedouro e proteger o canal de fuga, adjacente à estrutura, das flutuações decorrentes do ressalto hidráulico na bacia de dissipação.

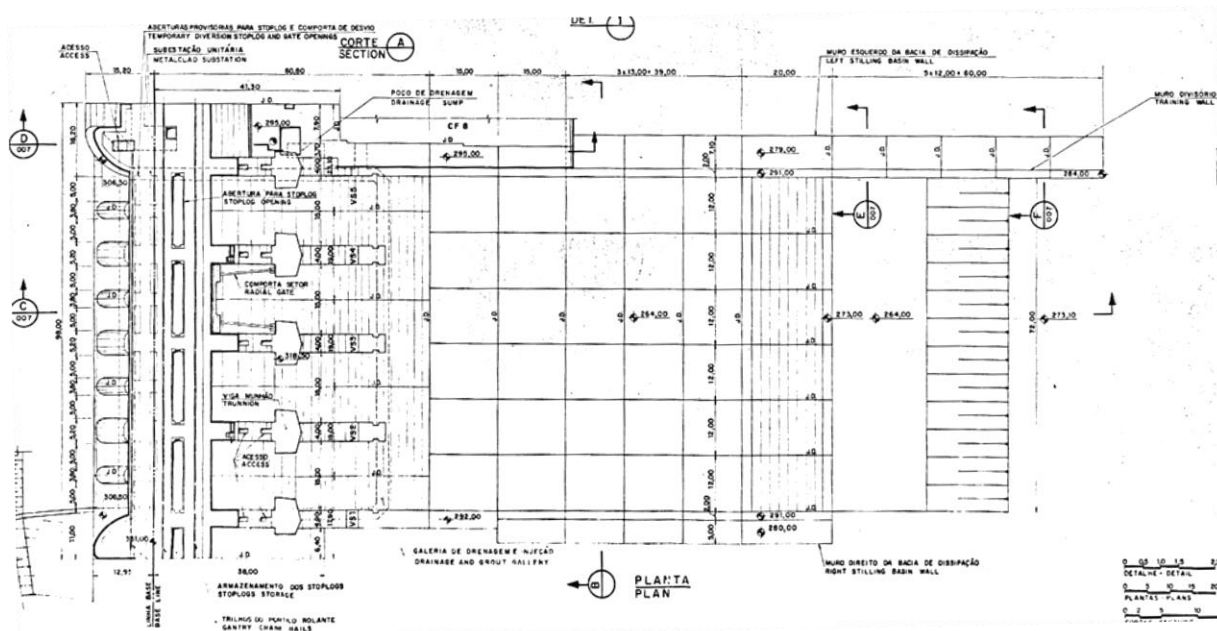


Figura 3.8 – Planta da estrutura do vertedouro.

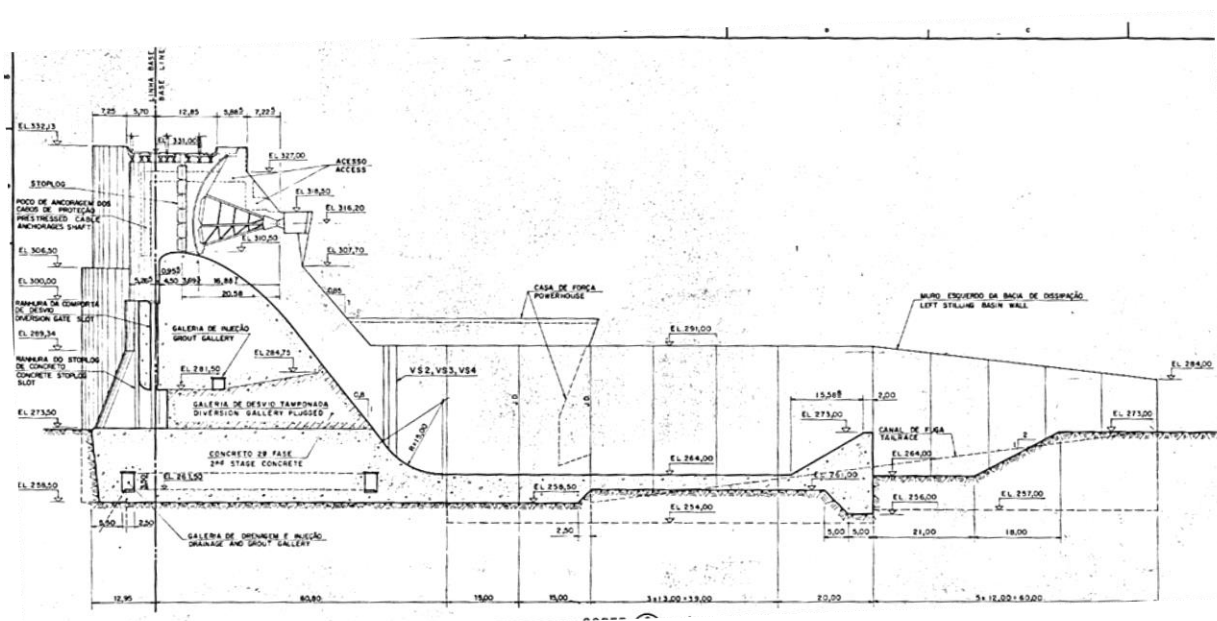


Figura 3.9 – Corte da estrutura do vertedouro (Corte "C").

A fundação do vertedouro foi devidamente instrumentada com extensômetros múltiplos para medição e acompanhamento dos recalques e deslocamentos horizontais dos blocos chave, bem como das camadas sub-horizontais presentes na fundação. Além disso, foram instalados piezômetros para monitoramento das subpressões abaixo da estrutura, principalmente na brecha basáltica arenosa identificada próximo à cota 240 m.

3.1.5 - Muros de Transição

Os muros de transição foram concebidos para garantir a interface entre as estruturas de concreto e as barragens de terra. A estrutura é composta por 3 blocos, separados por juntas de dilatação, com seções típicas distintas. Os blocos com a terminologia “1” (MD1, ME1) dizem respeito aos blocos adjacentes às barragens de terra, enquanto que os blocos com terminologia “2” representam os blocos intermediários e com terminologia “3” os blocos adjacentes às estruturas de concreto.

Na margem direita, a seção típica do bloco MD1 é composta por uma barragem de concreto compactado a rolo, com coroamento na cota 332,0 m, com declividade da face de montante de 0,1 H : 1,0 V e da face de jusante de 0,6 H : 1,0 V, com um trecho vertical a jusante acima da elevação 321,0 m. A seção típica do bloco MD2 é composta por uma barragem de concreto compactado a rolo, com coroamento variando entre as cotas 331,0 m e 332,0 m, com declividade da face de montante de 0,1 H : 1,0 V e da face de jusante de 0,65 H : 1,0 V, com um trecho vertical a jusante acima da elevação 321,0 m. Já a seção típica do bloco MD3 é composta por uma barragem de concreto compactado a rolo, com coroamento na cota 331,0 m, com declividade da face de montante de 0,1 H : 1,0 V e da face de jusante de 0,7 H : 1,0 V, com um trecho vertical a jusante acima da elevação 312,0 m. Nesta seção, a largura da crista é superior às demais, com cerca de 14,0 m, encerrando um vão para armazenamento da comporta stop-log e as estruturas do pórtico rolante.

Todas as estruturas do muro de transição da margem direita encontram-se apoiadas sobre basalto denso, na cota 271,0 m, com altura das estruturas variando de 60,0 m a 61,0 m. A galeria de drenagem e injeção foi concebidas na cota 274,0 m, próxima à face de montante, de modo a permitir a instrumentação da estrutura e fundação, bem como proporcionar o alívio da subpressão por meio dos furos de drenagem.

Na margem esquerda, a seção típica do bloco ME1 é composta por uma barragem de concreto compactado a rolo, com coroamento na cota 332,0 m, com declividade da face de montante de 0,1 H : 1,0 V e da face de jusante de 0,6 H : 1,0 V, com um trecho vertical a jusante acima da elevação 321,0 m. A seção típica do bloco MD2 é composta por uma barragem de concreto compactado a rolo, com coroamento variando entre as cotas 331,0 m e 332,0 m, com declividade da face de montante de 0,1 H : 1,0 V e da face de jusante de 0,65 H : 1,0 V, com um trecho vertical a jusante acima da elevação 321,0 m. Já a seção típica do bloco MD3 é composta por uma barragem de concreto compactado a rolo, com coroamento na cota 331,0 m, com declividade da face de montante de 0,1 H : 1,0 V e da face de jusante de 0,7 H : 1,0 V, com um trecho vertical a jusante acima da elevação 312,0 m. Nesta seção, a largura da crista é superior às demais, com cerca de 14,0 m, encerrando um vão para armazenamento da comporta stop-log e as estruturas do pórtico rolante.

Abaixo do muro de transição da ME, inserida no basalto denso, foi identificada uma possível junta falha indicada em projeto, a qual foi instrumentada com piezômetros. Os muros de transição foram instrumentados com piezômetros na fundação, para

acompanhamento da subpressão sob a estrutura. Ainda, no contato concreto-aterro, foram instaladas células de pressão total para acompanhamento das tensões nesta zona.

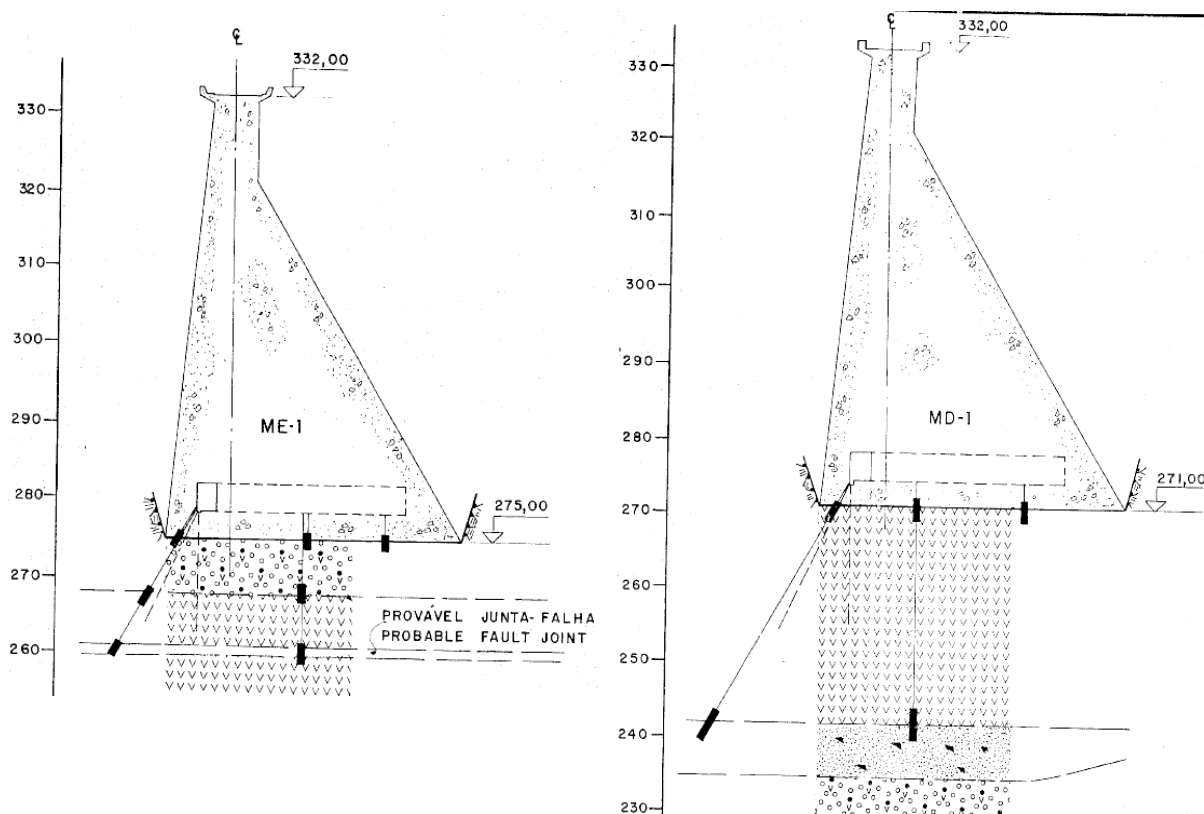


Figura 3.10 – Seção transversal dos muros de transição.

3.1.6 - Casa de Força

A estrutura da casa de força abriga o circuito de geração e é composta de tomada d'água, conduto forçado, conjunto turbina/gerador e canal de fuga.

A tomada d'água foi construída em concreto armado a partir da El. 272,0 m e até o topo situado na El. 331,0 m, sendo fundada em uma pequena camada de basalto vesículo amigdaloidal, assente sobre basalto denso. A estrutura é dotada de oito emboques duplos, conectados a uma unidade geradora cada, com um conjunto de grades instaladas no paramento de montante. Nela, estão concebidas duas comportas: uma comporta stop-log para esgotamento do circuito de geração e manutenção e uma comporta de emergência, para proteção dos equipamentos do circuito de geração. A movimentação das comportas é feita por meio de pórtico rolante com acionamento elétrico implantado na crista da estrutura.

A casa de força fica localizada imediatamente a jusante da tomada d'água, conectada a esta por uma tubulação forçada de aproximadamente 41,0 m, abrigada no corpo da tomada d'água. A casa de força foi concebida em concreto armado, servindo de abrigo ao

conjunto de turbina e gerador. Foram previstas 8 unidades de turbina Francis, das quais 5 ficam em operação, com potência unitária de 161,5 MW, perfazendo o total de 807,5 MW de potência instalada na usina.

O alívio da subpressão sob a estrutura dá-se pela execução de uma cortina de injeções e de uma linha de drenos, executados a partir da galeria de drenagem e injeção localizada na elevação 275,0 m. Sua fundação foi assente sobre um horizonte de basalto denso, aproximadamente na elevação 272,0 m, abaixo da qual foi identificada uma brecha basáltica arenosa, devidamente instrumentada com piezômetros e extensômetros múltiplos para monitoramento de seu comportamento.

O canal de fuga possui aproximadamente 222 m de largura e foi escavado na cota 255,0 m, com rampa de restituição com inclinação de 1 V : 8 H, até nivelamento à cota natural do rio. Lateralmente, a estrutura encontra-se confinada em ambos os lados por muros de concreto armado.

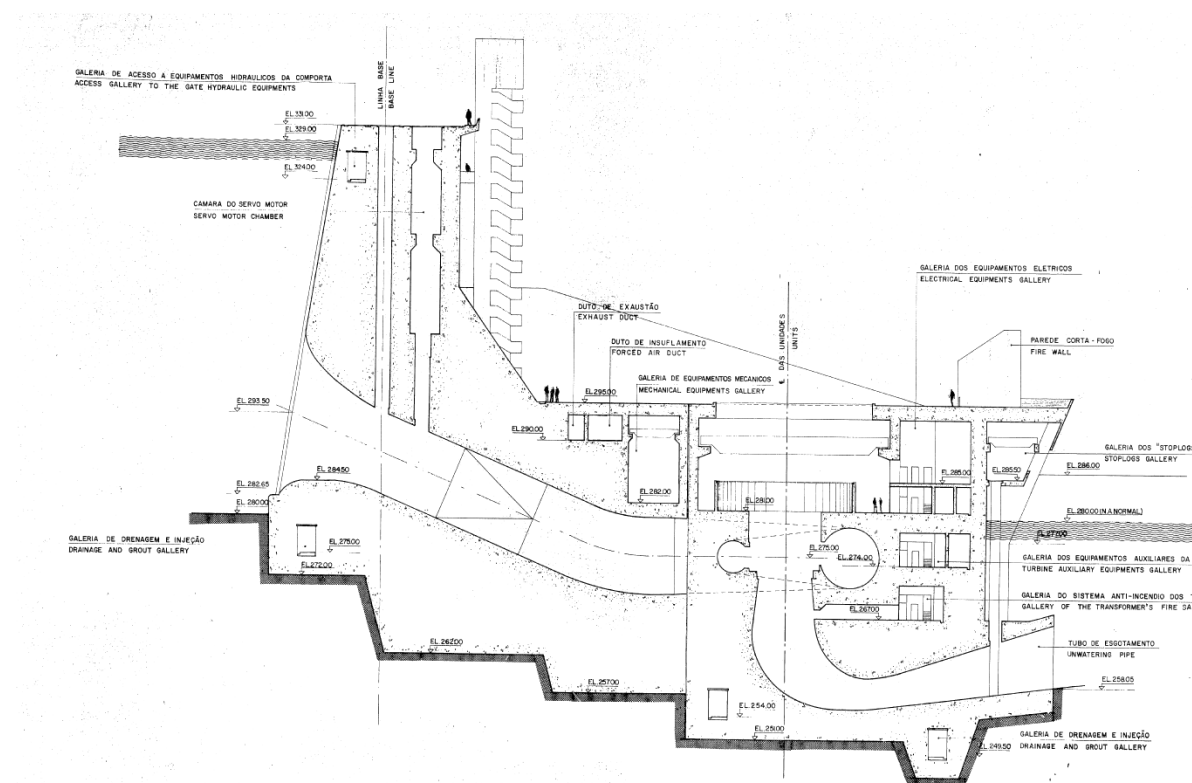


Figura 3.11 – Seção transversal da estrutura da casa de força.

3.1.7 - Barragem de Gravidade

A barragem de gravidade é responsável pelo fechamento entre as estruturas da tomada d'água (casa de força) e do muro de transição da margem esquerda. A estrutura é composta por uma barragem de gravidade em concreto compactado com rolo, com

coroamento na cota 332,0 m e dividida em 2 blocos de aproximadamente 24,05 m, separados por junta de dilatação. Sua seção assemelha-se a seção da casa de força e tomada d'água, descrita anteriormente. A jusante da estrutura, está localizada a área de montagem em patamar estabelecido na cota 295,0 m.

A estrutura encontra-se assente sobre uma camada de basalto vesículo amigdaloidal e basalto denso, em sua maior parte na cota 272,0 m, com as escavações para execução do poço de esgotamento estendendo-se até a cota 241,0 m. Próximo à cota 240,0 m, foi identificada uma brecha basáltica arenosa, à semelhança das demais estruturas de concreto.

O alívio da subpressão sob a estrutura dá-se pela execução de uma cortina de injeções e de uma linha de drenos, executados a partir da galeria de drenagem e injeção localizada na elevação 275,0 m. Foram instalados piezômetros e extensômetros múltiplos para monitoramento da fundação.

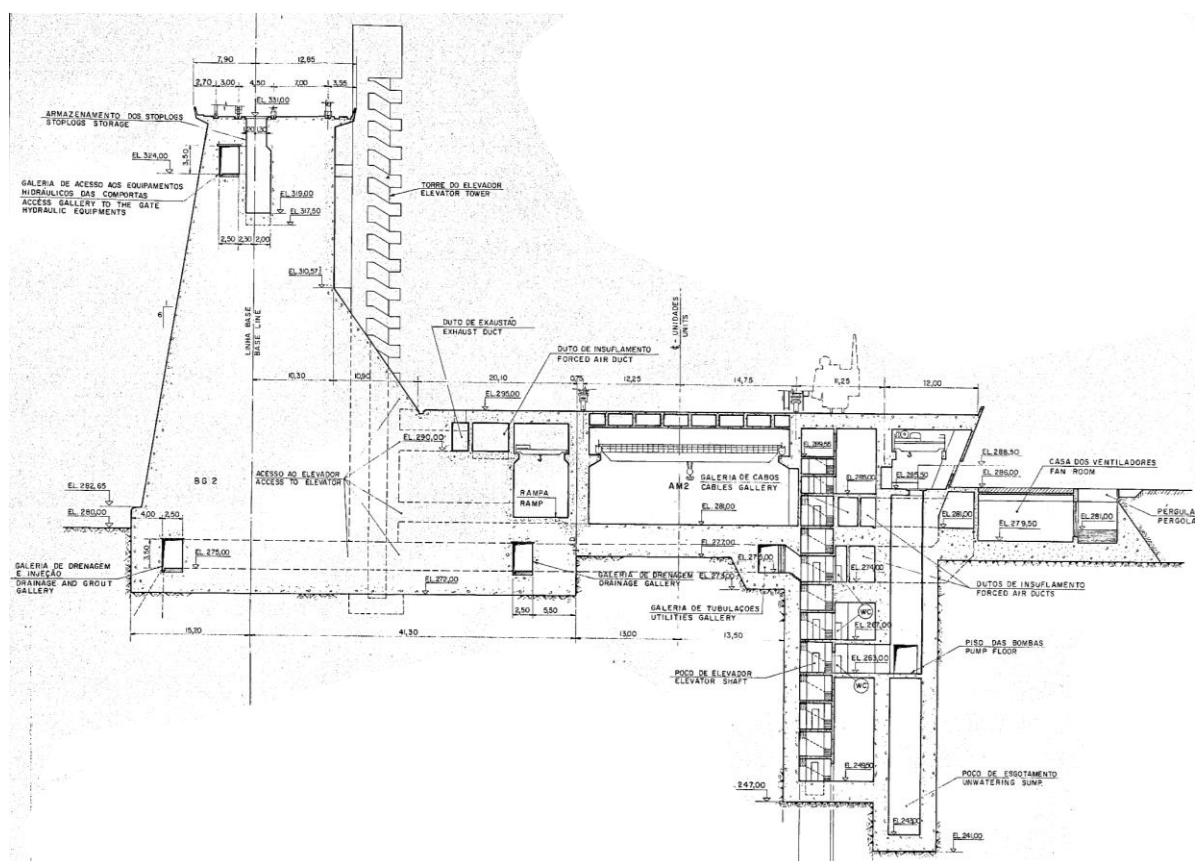


Figura 3.12 – Seção transversal da estrutura da barragem de gravidade.

3.2 - Aplicação do Modelo FMEA

A estruturação do modelo FMEA tem início com a definição do nível de complexidade da análise das principais estruturas contempladas. O nível de profundidade escolhido para a

análise dos sistemas no presente trabalho visou contemplar todos os elementos representados em projeto, evitando-se, no entanto, uma subdivisão muito detalhada de sistemas complexos (como é o caso das peças e equipamentos componentes de uma turbina, por exemplo). Deste modo, o nível de complexidade escolhido atendeu ao objetivo do estudo, permitindo a comparação dos riscos entre estruturas, sem, no entanto, adentrar em minúcias das quais seriam necessárias informações mais aprofundadas. A estruturação do nível de complexidade e os principais sistemas contemplados estão apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Estruturação dos sistemas do método FMEA.

1. Barragem de Terra - Margem Esquerda	2. Barragem de Terra - Margem Direita	3. Casa de Força
1.1. Seção "E" 1.1.1. Crista 1.1.2. Espaldar Jusante 1.1.3. Espaldar Montante 1.1.3.1. Rip-rap 1.1.4. Aterro Compactado 1.1.4.1. Interface Aterro-Filtro 1.1.5. Sistema de Drenagem Interna 1.1.5.1. Filtro Vertical 1.1.5.2. Filtro Horizontal 1.1.5.3. Dreno de Pé 1.1.6. Reaterro 1.1.7. Cut-off 1.1.8. Fundação 1.1.8.1. Interface Barragem-Fundação 1.1.8.2. Instrumentação da Fundação (brecha basáltica arenosa) 1.2. Seção "F" 1.2.1. Crista 1.2.2. Espaldar Jusante 1.2.3. Espaldar Montante 1.2.3.1. Rip-Rap 1.2.4. Aterro Compactado 1.2.4.1. Interface Aterro-Filtro 1.2.5. Sistema de Drenagem Interna 1.2.5.1. Filtro Vertical 1.2.5.2. Filtro Horizontal 1.2.5.3. Dreno de Pé 1.2.6. Reaterro 1.2.7. Fundação 1.2.7.1. Interface Barragem-Fundação 1.2.7.2. Instrumentação da Fundação	2.1. Seção "B" 2.1.1. Crista 2.1.2. Espaldar Jusante 2.1.3. Espaldar Montante 2.1.3.1. Rip-Rap 2.1.4. Aterro Compactado 2.1.4.1. Interface Aterro-Filtro 2.1.5. Sistema de Drenagem Interna 2.1.5.1. Filtro Vertical 2.1.5.2. Filtro Horizontal 2.1.5.3. Dreno de Pé 2.1.6. Reaterro 2.1.7. Cut-off 2.1.8. Fundação 2.1.8.1. Interface Barragem-Fundação 2.1.8.2. Instrumentação da Fundação (brecha basáltica arenosa) 2.2. Seção "C" 2.2.1. Crista 2.2.2. Espaldar Jusante 2.2.3. Espaldar Montante 2.2.3.1. Rip-Rap 2.2.4. Aterro Compactado 2.2.4.1. Interface Aterro-Filtro 2.2.5. Sistema de Drenagem Interna 2.2.5.1. Filtro Vertical 2.2.5.2. Filtro Horizontal 2.2.5.3. Dreno de Pé 2.2.6. Reaterro 2.2.7. Cut-off 2.2.8. Fundação 2.2.8.1. Interface Barragem-Fundação 2.2.8.2. Instrumentação da Fundação (brecha basáltica arenosa) 2.3. Seção "D" 2.3.1. Crista 2.3.2. Espaldar Jusante 2.3.3. Espaldar Montante 2.3.3.1. Rip-Rap 2.3.4. Aterro Compactado 2.3.4.1. Interface Aterro-Filtro 2.3.5. Sistema de Drenagem Interna 2.3.5.1. Filtro Vertical	3.1. Tomada D'água 3.1.1. Grade da Tomada D'água 3.1.2. Comporta Stop-log 3.1.3. Comporta Emergência 3.2. Conduto Forçado 3.3. Turbina* 3.4. Gerador* 3.5. Poço de Esgotamento (bombas) 3.6. Área de Montagem 3.7. Galeria de Drenagem e Injeção 3.8. Canal de Fuga 3.9. Fundação 3.9.1. Instrumentação da Fundação

1. Barragem de Terra - Margem Esquerda	2. Barragem de Terra - Margem Direita	3. Casa de Força
	2.3.5.2. Filtro Horizontal 2.3.5.3. Dreno de Pé 2.3.5.6. Enrocamento de pé 2.3.6. Fundação 2.3.6.1. Interface Barragem-Fundação 2.3.6.2. Instrumentação da Fundação	

4. Vertedouro	5. Muro de Transição - Margem Esquerda/ Margem Direita	6. Barragem de Gravidade
4.1. Comporta Segmento 4.2. Comporta Stop-Log 4.3. Ogiva (Perfil Creager) 4.4. Viga Munhão 4.5. Muros Laterais (vãos) 4.6. Bacia de Dissipação 4.6.1. Muros laterais (bacia de dissipação) 4.7. Aproximação 4.8. Galeria de drenagem e injeção 4.9. Galeria de desvio tamponada 4.10. Fundação 4.10.1. Instrumentação da Fundação	5.1. Enrocamento 5.1.1. Aterro 5.1.2. Transição aterro-enrocamento 5.1.3. Mureta pé do enrocamento (montante) 5.2. Galeria de drenagem e injeção 5.3. Fundação 5.3.1. Instrumentação da Fundação	6.1. Galeria de drenagem e injeção 6.2. Fundação

É importante salientar que os dados utilizados no estudo não incluíram a análise dos dados de instrumentação existentes, tampouco as medidas estruturais já realizadas durante a fase de construção e operação do empreendimento.

A cada sistema, foram relacionados os principais modos de falha, seus efeitos finais, suas causas e as possíveis medidas de controle, estas últimas abordadas apenas de forma preliminar. Foram relacionadas como modos de falha as ocorrências que podem acarretar na perda parcial ou total da função das estruturas, indo desde a retirada da proteção vegetal no talude até a ruptura da barragem. Estas informações foram utilizadas pelo autor para balizar a escolha dos índices de severidade, ocorrência e detecção relacionadas a cada modo de falha e causa. O layout utilizado para o modelo FMEA segue os moldes daquele apresentado anteriormente na Figura 2.6, utilizado nos trabalhos de Vianna (2015), Melo (2014) e Espósito & Palmier (2013).

Os pesos dos índices de severidade, ocorrência e detecção foram embasados nos descritores verbais apresentados por Espósito & Palmier (2013) apud Vianna (2015), conforme relacionado na tabela da Figura 3.13. A classificação feita pelo autor baseou-se em critérios subjetivos, dado seu conhecimento em relação à segurança de estruturas de barragens e modos de falhas em barragens de terra e de concreto. A escolha destes índices foi justificada para os casos que apresentaram como resultado final maiores NPRs ou maiores criticidades.

ÍNDICE DE SEVERIDADE (S)		ÍNDICE DE OCORRÊNCIA (O)		ÍNDICE DE DETECÇÃO (D)	
S _i	Efeito	O _i	Probabilidade	D _i	Probabilidade
1	Muito baixo	1	Improvável (0,1%)	1	Quase certo
2, 3	Baixo	2, 3	Remoto (0,1 a 1%)	2	Muito alto
4, 5	Médio	4, 5, 6	Ocasional (1 a 10%)	3	Alto
6, 7, 8	Grave	7, 8, 9	Provável (10 a 20%)	4	Moderadamente alto
9	Muito grave	10	Frequente (>20%)	5	Moderado
10	Catastrófico	--	--	6	Baixo
--	--	--	--	7	Muito baixo
--	--	--	--	8	Remoto
--	--	--	--	9	Muito remoto
--	--	--	--	10	Quase impossível

Figura 3.13 - Classificação dos índices de severidade, ocorrência e detecção (fonte: Adaptado de Espósito & Palmier, 2013, apud Vianna, 2015).

O resultado da análise quanto ao Número de Prioridade de Risco (NPR), o qual engloba, além da criticidade, a facilidade de detecção do mecanismo de falha ($NPR = S \times O \times D$), obteve valores que variaram de 6 a 150. De um total de 194 sistemas analisados, 22 deles apresentaram NPR igual ou superior a 120, os quais estão apresentados na Tabela 3.2, retirada do apêndice. A tabela completa encontra-se, na íntegra, no apêndice, devido a sua extensão.

O sistema que apresentou maior NPR (150), segundo a análise, foi o modo de falha 5.3.(1) correspondente à movimentação de massa na fundação do muro de transição da margem esquerda, na região onde foi identificada uma junta-falha intrusiva entre camadas de basalto denso, localizada a aproximadamente 10 metros abaixo da transição para o basalto vesículo-amigdaloidal. O material de preenchimento é constituído em grande parte por argilo-minerais e carbonato de cálcio, provenientes de precipitações químicas de soluções residuais do material originário de rochas basálticas.

Não foi possível conseguir informações precisas sobre quais tratamentos foram realizados na região da junta-falha, sendo este um item de incerteza na análise deste modo de falha em específico. O projeto de instrumentação da estrutura contemplou a instalação de 3 linhas de piezômetros para monitoramento da fundação: (i) três piezômetros instalados em uma mesma prumada, inclinados a montante, para monitoramento da junta-falha, do contato entre basalto denso e basalto vesículo-amigdaloidal e contato entre concreto-fundação; (ii) três piezômetros instalados em mesma prumada na linha de centro da fundação, com monitoramento das mesmas camadas relacionadas anteriormente; e (iii) um piezômetro a jusante, no contato concreto-fundação.

Esta disposição dos instrumentos na seção de interesse têm grande aplicação prática no monitoramento da colmatação dos drenos e na eficiência da cortina de injeção, permitindo

uma análise rápida da queda ou aumento da poropressão a montante e jusante destes elementos. No entanto, o monitoramento do deslizamento entre camadas no plano de fragilidade gerado pela junta-falha não foi devidamente instrumentado por extensômetros na fundação.

A presença de material argiloso no preenchimento da junta-falha pode acarretar na perda de resistência ao deslizamento do plano, devido à “lubrificação” entre camadas. Este fenômeno foi observado na barragem de Camará, na qual a causa da ruptura foi associada à falha geológica existente na ombreira, que não foi devidamente tratada durante a construção (Kanji apud Vianna, 2015). Devido à falta de informações a respeito dos tratamentos realizados na fundação durante a construção do empreendimento, pouco se pode afirmar acerca da segurança na região da junta-falha. No entanto, pode-se ponderar que a falha foi devidamente identificada, representada em projeto e instrumentada com piezômetros, indicando que foram tomadas medidas preventivas durante esta fase.

Em síntese, a existência da junta-falha sob a fundação da estrutura do muro de transição da margem esquerda aumenta os riscos associados à falha da estrutura, principalmente devido à escala das consequências envolvidas e à falta de monitoramento das movimentações do maciço da fundação.

Após discorrido sobre o modo de falha, encontram-se apresentados a seguir os pesos dados aos índices e sua justificativas técnica:

- **Índice de Severidade “Catastrófico (10)”** – o colapso de estruturas devido ao escorregamento de contatos entre feições geológicas tende a ocorrer de maneira abrupta, tornando este tipo de falha ainda mais severo do que outros mecanismos que também tendem a ocasionar a ruptura da barragem. Deste modo, a ocorrência de uma junta falha sob a estrutura do muro de transição da margem esquerda representa uma ameaça com consequências “catastróficas (10)”, incorrendo na liberação descontrolada de um grande volume de água, atingindo o vale de jusante em um curto espaço de tempo, dificultando a evacuação das zonas de risco e incorrendo em maior possibilidade de perdas de vidas humanas;
- **Índice de Ocorrência “Remoto (2)”** – apesar de identificada a junta falha, foram realizadas inúmeras investigações geológicas durante as fases de projeto e construção do empreendimento, em grande parte devido também a ocorrência da brecha basáltica arenosa sob as estruturas de concreto, exigindo um elevado grau de tratamento da fundação abaixo destas. Não há relatos específicos acerca da provável junta-falha identificada sob a estrutura do muro de transição da margem esquerda, no entanto, foi feita a escolha do índice de ocorrência “remoto (2)” devido a sua identificação ainda na fase de projeto e nos tratamentos realizados na fundação, os quais reduzem as chances de ocorrência deste evento;
- **Índice de Detecção “Moderado (5)”** – a escolha do índice de detecção “moderado (5)” deveu-se à falta de instrumentação na seção de ocorrência da falha de modo a permitir o acompanhamento dos deslocamentos entre camadas

geológicas. Conforme projeto básico, foi prevista apenas a instalação de piezômetros para monitoramento da poropressão e do aumento na taxa de percolação, indicando a evolução de um processo de piping.

Além deste sistema, outros dois foram considerados relevantes e analisados em maior profundidade, tendo sua classificação justificada a seguir.

O modo de falha 2.3.4.(3) apresentou NPR = 144, sendo, portanto, o segundo maior na classificação deste índice. Este sistema correspondente à percolação excessiva no aterro compactado da barragem de terra (Seção D), evoluindo para uma erosão interna e piping. A causa associada ao NPR elevado está relacionada com a abertura de fissuras internas no sentido transversal devido ao arqueamento da estrutura na região com recalques diferenciais elevados.

A fundação sob a estrutura da margem direita apresenta perfil bastante irregular, conforme apresentado anteriormente na Figura 3.2, aonde é possível identificar um desnível de aproximadamente 20 m próximo à estaca 65. Esta zona caracteriza-se pela ocorrência de dois materiais (maciço da fundação e aterro compactado) com módulos de deformabilidade distintos, incorrendo em recalques diferenciais entre seções transversais. Na zona inclinada da fundação, aonde há o contato entre o material compactado do aterro e a fundação, a diferença de deformabilidade entre materiais pode ainda ocasionar o arqueamento da barragem de terra, havendo um alívio das tensões devido a transferência das cargas do aterro ao material de contato, resultando em zonas de tração com abertura de fissuras internas. Este fenômeno é geralmente observado em barragens zonadas, onde a diferença de deformabilidade entre os materiais dos espaldares e do núcleo impermeável e filtro acabam acarretando o aparecimento de fissuras longitudinais na crista das estruturas.

No caso em análise, a abertura de fissuras transversais representa um risco muito maior para a ocorrência de piping, devido à diminuição do caminho de percolação e ao consequente aumento das vazões percoladas, com possibilidade de carreamento de material. Além disso, o talude verticalizado da fundação é composto pelo encontro entre diversos horizontes geológicos, característica que confere uma maior probabilidade de percolação excessiva e desenvolvimento de piping.

Ao longo de toda a barragem de terra foram instalados medidores de recalque, de modo que uma análise dos recalques diferenciais na seção longitudinal pode ser obtida. As seções também foram devidamente instrumentadas com piezômetros nos filtros e fundação, medidores de nível d'água e medidores de vazão, permitindo o monitoramento do aumento das vazões percoladas pelo maciço. Não foi possível identificar se foram instalados instrumentos específicos para monitoramento da abertura de fissuras nas zonas de alívio de tensão.

Com base nos apontamentos, as justificativas para os índices escolhidos estão apresentadas a seguir:

- **Índice de Severidade “Muito grave (9)”** - a ocorrência deste modo de falha tem como resultado final a ruptura da barragem, com liberação descontrolada de água e consequências bastante graves no vale de jusante. A distinção entre o índice de severidade “muito grave (9)” e “catastrófico (10)” foi determinada pelo tempo de formação do processo de ruptura, o qual tende a ser mais lento no caso de erosão regressiva do que durante o colapso de estruturas de concreto, permitindo que haja a evacuação das zonas de risco e incorrendo em menos perdas de vidas humanas;
- **Índice de Ocorrência “Ocasional (4)”** – o índice de ocorrência foi escolhido com base na probabilidade da abertura de fissuras transversais ao longo do talude da barragem de terra, criando um caminho preferencial de percolação que pode levar ao piping. A barragem de terra em sua Seção D apresenta a maior altura dentre todas as seções analisadas – cerca de 60 metros de altura em seu trecho mais elevado – sendo, portanto, mais propensa a recalques. Além disso, este trecho apresenta uma mudança de seção brusca (ver perfil longitudinal na Figura 3.2), estando, portanto, mais sujeito ao fenômeno de arqueamento, com formação de zonas de alívio de tensão que podem acarretar em fissuras internas, permitindo a percolação excessiva e carreamento de material;
- **Índice de Detecção “Moderadamente Alto (4)”** – apesar do ambiente favorável ao desenvolvimento do processo de erosão interna, a fundação da barragem de terra na Seção D foi devidamente instrumentada a partir de piezômetros instalados no filtro horizontal e nas camadas mais propensas ao carreamento de material (brecha basáltica arenosa e solo de alteração de basalto), bem como extensômetros múltiplos no corpo da barragem para acompanhamento dos recalques ocorridos. Deste modo, é provável que qualquer alteração na percolação destas camadas seja refletida nas leituras destes instrumentos, tendo sido considerada a probabilidade de detecção “moderadamente alta (4)”.

O modo de falha 1.1.8.(1) apresentou NPR = 135, sendo o terceiro na classificação deste índice. Este sistema correspondente ao modo de falha referente à erosão interna da fundação da barragem da Seção E, evoluindo para um piping, devido ao aumento da percolação na fundação.

A principal característica relacionada a esta seção diz respeito à heterogeneidade das camadas presentes na fundação da estrutura, com o agravante que esta se encontra apoiada sobre solo de alteração de basalto, interceptado por um cut-off para redução da percolação no maciço da fundação. Abaixo deste, foi identificada a ocorrência da brecha basáltica arenosa a exemplo de outras estruturas já relatadas.

As causas que podem dar início ao mecanismo de piping nesta seção são bastante variadas, podendo-se citar: (i) carreamento de material da fundação devido a excesso de finos ou granulometria aberta; (ii) colmatação do filtro devido ao carreamento dos finos da fundação ao filtro horizontal; (iii) falha na execução do cut-off com elevação da taxa de percolação; (iv) aumento do gradiente hidráulico a jusante do pé da estrutura; dentro outros. O elevado número de mecanismos que podem resultar na falha da estrutura por piping da fundação teve impacto sobre a escolha do índice de ocorrência adotado.

Apesar da ocorrência de diversas camadas geológicas na fundação, a barragem foi devidamente instrumentada com piezômetros para monitoramento da percolação entre camadas, a montante e jusante do cut-off e no filtro horizontal, além de medidores de nível d'água e medidores de vazão.

As justificativas para os índices escolhidos estão apresentadas a seguir:

- **Índice de Severidade “Muito grave (9)”** - o índice de severidade escolhido segue a mesma lógica utilizada anteriormente para o modo de falha 2.3.4.(3), sendo escolhido o índice “muito grave (9)” devido ao tempo de abertura total da brecha;
- **Índice de Ocorrência “Ocasional (5)”** - historicamente, o mecanismo de falha de erosão interna é o segundo com maior probabilidade de ocorrência em barragens de terra, estando atrás somente de falhas por galgamento. A erosão interna desenvolve-se quando há o carregamento de partículas (do aterro ou da fundação) devido a elevada percolação de água, criando caminhos preferenciais, onde há concentração das vazões percoladas e o início da erosão regressiva por piping. No caso da fundação da barragem de terra (Seção E), dois fatores foram determinantes para a escolha do índice de ocorrência “ocasional (5)”: a existência de uma brecha basáltica arenosa a menos de 10 metros abaixo da fundação da estrutura; e o horizonte escolhido para apoio da fundação, correspondente a um solo de alteração de basalto. Estes fatores, associados à elevada carga hidráulica devido à formação do reservatório, criam um ambiente propício ao desenvolvimento de poropressão elevada, podendo evoluir para um processo de piping na fundação;
- **Índice de Detecção “Alto (3)”** - semelhante ao apresentado anteriormente, a devida instrumentação do maciço permite acompanhar a movimentação da barragem e o aumento da percolação, tendo sido considerada a probabilidade de detecção “alta (3)”.

Tabela 3.2 – Trecho da planilha FMEA, contemplando os sistemas com NPR ≥ 120 (1 de 2).

Função	Modo de Falha	Efeito Final	S	Causa	O	Crit.	Controle	D	NPR
5.3. Fundação (Muros de Transição)									
Prover suporte para a barragem e enrocamento	5.3.(1) Movimento de massa	Colapso da estrutura (ruptura)	10 VI	Plano de fragilidade na fundação, não identificado no reconhecimento geológico	2 II	20	Aumentar as investigações geológicas durante a etapa de projeto/ monitoramento da fundação	6	120
				Deslizamento na provável junta-falha sob a estrutura do muro de transição da margem esquerda	3 II	30		5	150
2.3.4. Aterro Compactado (Seção D)									
Manter a estabilidade mecânica	2.3.4.(1) Instabilidade devido a movimento de massa	Instabilidade global da barragem	10 VI	Percolação ou poropressão elevada	4 III	40	Inspeção visual/ monitoramento e construção de poços de alívio ou bermas estabilizadoras	3	120
Aumentar o caminho de percolação, reduzindo o gradiente hidráulico	2.3.4.(3) Percolação excessiva	Erosão regressiva com piping	9 V	Carregamento excepcional (rebaixamento rápido)	4 III	40	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	120
1.1.8. Fundação (Seção E)				Fissuração interna devido a recalques excessivos ou recalques diferenciais entre seções	4 III	36	Monitoramento por instrumentação/ injeção ou construção de sistemas de filtro e drenagem	4	144
1.1.8(1) Erosão interna		Piping	9 V	Percolação excessiva de água, com carregamento de material	5 III	45	Execução de poços de alívio/ monitoramento e inspeção visual	3	135
1.1.4.1. Interface Aterro-Filtro (Seção E)									
Controle da percolação sem carregamento de material da barragem	1.1.4.1.(2) Colmatção da interface do filtro	Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade global da barragem, levando à ruptura	10 VI	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4 III	40	Aumento da investigação dos materiais geotécnicos/ inspeção e monitoramento por instrumentação	3	120
1.1.4. Aterro Compactado (Seção E)									
Manter a estabilidade mecânica	1.1.4.(1) Instabilidade devido a movimento de massa	Instabilidade global da barragem	10 VI	Percolação ou poropressão elevada	4 III	40	Inspeção visual/ monitoramento e construção de poços de alívio ou bermas estabilizadoras	3	120
				Carregamento excepcional (rebaixamento rápido)	4 III	40	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	120
1.2. Barragem de Terra (Seção F)									
Conter o reservatório	1.2.(2) Movimento de massa	Instabilidade global da estrutura, com liberação descontrolada de água	10 VI	Carregamentos excepcionais	4 III	40	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	120
1.2.4. Aterro Compactado (Seção F)									
Manter a estabilidade mecânica	1.2.4.(1) Instabilidade devido a movimento de massa	Instabilidade global da barragem	10 VI	Carregamento excepcional (rebaixamento rápido)	4 III	40	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	120
2.1. Barragem de Terra (Seção B)									
Conter o reservatório	2.1.(2) Movimento de massa	Instabilidade global da estrutura, com liberação descontrolada de água	10 VI	Carregamentos excepcionais	4 III	40	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	120
				Aumento da subpressão e consequente redução da tensão efetiva	4 III	40	Monitoramento com piezômetros/ execução de estruturas de alívio ou bermas estabilizadoras	3	120
2.1.4. Aterro Compactado (Seção B)									
Manter a estabilidade mecânica	2.1.4.(1) Instabilidade devido a movimento de massa	Instabilidade global da barragem	10 VI	Percolação ou poropressão elevada	4 III	40	Inspeção visual/ monitoramento e construção de poços de alívio ou bermas estabilizadoras	3	120
				Carregamento excepcional (rebaixamento rápido)	4 III	40	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	120
2.1.4.1. Interface Aterro-Filtro (Seção B)									
Controle da percolação sem carregamento de material da barragem	2.1.4.1.(2) Colmatção da interface do filtro	Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade global da barragem, levando à ruptura	10 VI	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4 III	40	Aumento da investigação dos materiais geotécnicos/ inspeção e monitoramento por instrumentação	3	120

Tabela 3.3 – Trecho da planilha FMEA, contemplando os sistemas com NPR ≥ 120 (2 de 2).

Função	Modo de Falha	Efeito Final	S	Causa	O	Crit.	Controle	D	NPR
2.2. Barragem de Terra (Seção C)									
Conter o reservatório	2.2.(2)	Instabilidade global da estrutura, com liberação descontrolada de água	10 VI	Carregamentos excepcionais	4 III	40	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	120
2.2.4. Aterro Compactado (Seção C)									
Manter a estabilidade mecânica	2.2.4.(1)	Instabilidade devido a movimento de massa	10 VI	Carregamento excepcional (rebaixamento rápido)	4 III	40	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	120
2.3. Barragem de Terra (Seção D)									
Conter o reservatório	2.3.(2)	Instabilidade global da estrutura, com liberação descontrolada de água	10 VI	Carregamentos excepcionais	4 III	40	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	120
				Aumento da subpressão e consequente redução da tensão efetiva	4 III	40	Monitoramento com piezômetros/ execução de estruturas de alívio ou bermas estabilizadoras	3	120
2.3.4.1. Interface Aterro-Filtro (Seção D)									
Controlar a percolação sem carregamento de material da barragem	2.3.4.1.(2)	Colmatação da interface do filtro	10 VI	Excesso de materiais finos, causando a colmatação do filtro	4 III	40	Aumento da investigação dos materiais geotécnicos/ inspeção e monitoramento por instrumentação	3	120
3. Estrutura Civil (Casa de Força)									
Conter o reservatório e garantir a estabilidade	3.(2)	Ruptura da estrutura civil, com liberação descontrolada de água	10 VI	Carregamentos excepcionais (subpressão, sismo, assoreamento, etc)	4 III	40	Verificação de estabilidade global para os casos de carregamento excepcionais/ rebaixamento do reservatório	3	120
3.9. Fundação (Casa de Força)									
Prover suporte para as estruturas da casa de força	3.9.(1)	Colapso da estrutura (ruptura)	10 VI	Plano de fragilidade na fundação, não identificado no reconhecimento geológico	2 II	20	Aumentar as investigações geológicas durante a etapa de projeto	6	120
4. Estrutura Civil (Vertedouro)									
Descarregar as cheias excepcionais garantindo a integridade das estruturas	4.(1)	Ruptura da estrutura civil do vertedouro	10 VI	Carregamentos excepcionais (subpressão, sismo, assoreamento, etc)	4 III	40	Verificação de estabilidade global para os casos de carregamento excepcionais/ rebaixamento do reservatório	3	120
4.10. Fundação (Vertedouro)									
Prover suporte para as estruturas do vertedouro	4.10.(1)	Colapso da estrutura (ruptura)	10 VI	Plano de fragilidade na fundação, não identificado no reconhecimento geológico	2 II	20	Aumentar as investigações geológicas durante a etapa de projeto/ monitoramento da fundação	6	120
5. Estrutura Civil (Muro de Transição ME/MD)									
Garantir estabilidade e conter o reservatório	5.(1)	Ruptura da estrutura civil, com liberação descontrolada de água	10 VI	Carregamentos excepcionais (subpressão, sismo, assoreamento, etc)	4 III	40	Verificação de estabilidade global para os casos de carregamento excepcionais/ rebaixamento do reservatório	3	120
6. Estrutura Civil (Barragem de Gravidade)									
Garantir estabilidade e conter o reservatório	6.(1)	Ruptura da estrutura civil, com liberação descontrolada de água	10 VI	Carregamentos excepcionais (subpressão, sismo, assoreamento, etc)	4 III	40	Verificação de estabilidade global para os casos de carregamento excepcionais/ rebaixamento do reservatório	3	120
6.2. Fundação (Barragem de Gravidade)									
Prover suporte para a barragem e enrocamento	6.2.(1)	Colapso da estrutura (ruptura)	10 VI	Plano de fragilidade na fundação, não identificado no reconhecimento geológico	2 II	20	Aumentar as investigações geológicas durante a etapa de projeto/ monitoramento da fundação	6	120

A análise dos resultados foi feita também para os elementos que apresentaram maior criticidade ($Crit. = S \times O$), eliminando-se o peso dado pelo índice de detecção. Os valores de criticidade variaram entre 4 e 45 dentre os 194 elementos analisados, sendo que 17 deles apresentaram criticidade igual ou superior a 40. Destes, apenas o modo de falha 1.1.8.(1) – tratado anteriormente - apresentou $Crit = 45$, enquanto todos os demais foram classificados com $Crit = 40$, não permitindo uma ordenação relevante dos sistemas por meio deste índice.

Uma análise comparativa entre os sistemas contemplados pela análise do NPR e pela análise do índice de criticidade foi feita a partir da plotagem dos modos de falha em uma matriz de risco, confrontando os valores de Severidade e Ocorrência, conforme apresentado na Figura 3.14.

		Maiores Índices de NPR ($NPR \geq 120$) e Criticalidade ($Crit \geq 40$)					
		*os itens grifados em vermelho constaram apenas na análise do NPR.					
Ocorrência	V						
	IV						
	III					2.3.4.(1) 1.1.4.1.(2) / 1.1.4.(1) 1.2.(2) / 1.2.4.(1) 2.1.(2) / 2.1.4.(1) / 2.1.4.1.(2) 2.2.(2) / 2.2.4.(1) 2.3.(2) / 2.3.4.1.(2) 3.(2) / 4.(1) 5.(1) / 6.(1)	
	II					2.3.4.(3) 1.1.8.(1)	5.3.(1) 3.9.(1) 6.2.(1) 4.10.(1)
	I						
		I	II	III	IV	V	VI
		Severidade					

Figura 3.14 – Matriz de risco dos sistemas com $NPR \geq 120$ e $Crit \geq 40$.

Esta forma de representação permite identificar rapidamente os elementos contemplados em cada uma das análises, sendo possível inferir que: (i) as falhas 5.3.(1), 3.9.(1), 6.2.(1) e 4.10.(1) estão relacionados com o colapso das estruturas de concreto devido a feições geológicas não identificadas durante a etapa de investigação geotécnica da fundação, sendo tratadas como incertezas e tendo portanto um índice de detecção “baixo (6)”; e (ii) a falha 2.3.4.(3) representa a falha por erosão regressiva devido a fissuração interna da barragem – tendo sido a falha com maior relevância no critério de NPR -, sendo

“menosprezada” na análise apenas do índice de criticidade devido ao seu efeito final apresentar severidade inferior a um colapso por movimentação de massa, ficando abaixo de estruturas que apresentam este modo de falha.

Durante a etapa de gestão do risco, a facilidade de detecção dos mecanismos de falha assume um grau de importância muito mais elevado em detrimento à análise apenas da severidade e da probabilidade de ocorrência, sendo, portanto, a classificação segundo o NPR muito mais adequada a esta finalidade.

Quanto a matriz de risco adotada para a análise dos resultados neste trabalho, optou-se pela utilização do mesmo layout utilizado no trabalho de Vianna (2015), com subdivisão dos índices de severidade e ocorrência dados conforme classificação proposta por Espósito & Palmier (2013). Apesar disso, é recomendado que a matriz de risco seja adaptada à realidade de cada empreendedor, tornando-se mais eficiente durante a etapa de tomada de decisão.

3.3 - Proposta de Gerenciamento do Risco com Base no Modelo FMEA

Foram analisados, de forma subjetiva, os benefícios obtidos com a utilização da ferramenta de análise de risco à fase de controle do risco, compreendendo a tomada de decisão quanto às ações de emergência.

Tendo em vista que o principal objetivo da gestão de riscos consiste na redução do risco global do empreendimento, o qual é consequência da probabilidade de ocorrência, dos danos e das incertezas, representados no modelo FMEA pelos índices de ocorrência (O), severidade (S) e detecção (D), foram propostas medidas que terão por objetivo principal a redução destes índices a valores toleráveis, através da proposição de medidas (estruturais ou não-estruturais).

As análises foram realizadas para as estruturas que apresentaram maior NPR, estando sintetizadas a seguir as principais medidas propostas à redução deste índice:

- 5.3.(1). Movimentação de massa na fundação (junta-falha sob o muro de transição da margem esquerda):
 - a redução do índice de severidade é bastante limitada, visto a extensão das consequências relacionadas a ruptura de uma barragem. O abrandamento da severidade pode, no entanto, ser garantido pela manutenção de Planos de Ações Emergenciais atualizados e pela instalação de sirenes nas zonas de auto salvamento;
 - a redução do índice de ocorrência pode ser obtida pelo aumento da investigação acerca da junta-falha: reunião de informações acerca dos tratamentos e investigações realizadas durante as fases de construção, elaboração de furos de investigação para análise da resistência do material da junta-falha, com elaboração de modelo matemático para verificação do

fator de segurança. Construção de bermas estabilizadoras a jusante, caso o estudo de estabilidade aponte redução do fator de segurança.

- a redução do índice de detecção pode ser obtida pela instalação de instrumentos para monitorar a movimentação do maciço da fundação, principalmente no plano de ocorrência da junta-falha. Pode-se prever um aumento na frequência de leituras de instrumentos existentes (bases de alongâmetro ou medidores triortogonais) para permitir que tendências de deslocamento sejam identificadas nas idades iniciais.
- 2.3.4.(3). Fissuração interna devido a recalques (barragem de terra seção D)
 - a redução do índice de severidade pode ser feita, a exemplo do elemento anterior, prezando-se pela manutenção de PAE atualizado e instalação de sirenes nas zonas de auto salvamento.
 - a redução do índice de ocorrência pode ser obtida, para o modo de falha em específico, pela elaboração de retroanálise do aterro através de modelo matemático calibrado com dados de instrumentação existente na barragem, para identificação das zonas de concentração e alívio de tensões, permitindo uma melhor avaliação do problema.
 - a redução do índice de detecção pode ser obtida pelo aumento da frequência de leitura de instrumentos (piezômetros e medidores de vazão) de modo a identificar o aumento nas vazões percoladas ou o carreamento de finos pelo filtro, geralmente pela análise de material presente nos medidores de vazão.
- 1.8.(1). Erosão interna da fundação (barragem de terra Seção E)
 - redução do índice de severidade por manutenção de PAE atualizado, semelhante aos demais;
 - a redução do índice de ocorrência pode ser obtido pela execução de poços de alívio a jusante, de modo a reduzir a subpressão na fundação e servir de filtro aos materiais carreados nas camadas da fundação.
 - a redução do índice de detecção pode ser obtida pelo aumento da frequência de leitura de instrumentos (piezômetros e medidores de vazão) e das inspeções regulares, de modo a identificar o aumento nas vazões percoladas ou o carreamento de finos pelo filtro, além de zonas de surgência a jusante.

As medidas propostas são sugestões de ações de segurança que poderiam ser tomadas pelo responsável pela segurança da barragem, não estando limitadas a estas.

As próximas etapas hipotéticas da gestão do risco no empreendimento em questão poderiam ser descritas por:

1. Aplicação de métodos quantitativos aos modos de falha mais relevantes, procedendo-se à apreciação do risco através de tabelas F-N;

2. Decisão quanto a tolerabilidade do risco ou a adoção de medidas (estruturais ou não estruturais);
3. Elaboração de estudos econômicos para avaliar a viabilidade e custo-benefício das medidas propostas;
4. Implementação das medidas de segurança;
5. Reavaliação dos riscos pelo modelo FMEA, atualizando-se os índices dadas as medidas adotadas.

4 - Conclusões e Recomendações

Após a utilização do modelo FMEA como auxílio à gestão de risco em barragens, pode-se mencionar as seguintes conclusões:

- A construção da planilha aplicada a um empreendimento específico instiga o conhecimento acerca de cada componente da estrutura, desde a estruturação do nível de profundidade que será utilizado na análise até o resgate de informações técnicas levantadas durante as etapas de projeto e construção para determinação de cada modo de falha, tornando seu idealizador um vasto conhecedor dos mecanismos e nuances presentes naquele empreendimento;
- A classificação dos índices de severidade, ocorrência e detecção aplicadas por um único profissional agregam vícios e limitações quanto a mecanismos complexos, sendo importante a participação de profissionais de diversas áreas antes da consolidação da estrutura final da planilha, bem como em cada revisão realizada;
- A ordenação das estruturas pelo NPR pareceu, ao presente autor, mais adequada para utilização como auxílio à gestão de riscos, agregando o índice de facilidade de detecção. Desta maneira, componentes não instrumentados, por exemplo, resultarão em NPRs elevados, uma vez que a falta de conhecimento do comportamento da estrutura prejudica a detecção prévia da formação de mecanismos de falha;
- O processo de tomada de decisão quanto a implementação de ações de segurança com foco na redução dos principais índices do modelo FMEA permite uma análise menos subjetiva, principalmente quando há limitação (temporal, econômica ou técnica) para elaboração de todas as medidas necessárias, focando-se nos elementos que representam maior risco ao empreendimento;

Com base nos resultados obtidos, considera-se que o objetivo principal do trabalho foi obtido, mostrando que a implementação do modelo FMEA como ferramenta de auxílio ao gerenciamento do risco reduziu a subjetividade das tomadas de decisão.

Sua aplicação nos processos permitiu uma maior clareza das ações de segurança necessárias, servindo, inclusive, como uma justificativa pautada em critérios técnicos no

caso de disputas judiciais decorrentes de decisões tomadas no âmbito da segurança da barragem.

No mais, vale ressaltar que os resultados obtidos no presente trabalho foram de ordem acadêmica, não tendo sido analisada sua aplicação em uma situação real de gerenciamento de risco no empreendimento. Deste modo, recomenda-se que o modelo seja revisto e ampliado, com posterior aplicação prática ao empreendimento escolhido.

5 - Referências

ANCOLD, 1994. **Guidelines on Risk Assessment**. apud PIMENTA, M. L. B. **Abordagens de riscos em barragens de aterro**. 2009. Lisboa: LNEC, 2009. 570 p.

ALMEIDA, A. B. **Curso sobre Operação e Segurança de Barragens, Capítulo 7**. Disponível em <<http://www.civil.ist.utl.pt/~joana/artigos%20risco%20ABA/pub-2001/capitulo-7-livro-curso%20INAG2001.pdf>>. Acesso em 10/04/2018.

ALMEIDA, A. B. **Risco Associado à segurança de Barragens**. Disponível em <<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571243001/texto-riscos.pdf>>. Acesso em 10/04/2018.

AUSTRALIA STANDARDS/NEW ZEALAND STANDARD. **Norma AS/NZS 4360:2004**. Risk Management. Aug., 2004.

AUSTRALIAN NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS (ANCOLD). **Guidelines on risk assessment**. Sydney: Australian National Committee on Large Dams Inc., 2003. 157 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 31000: Gestão de Riscos: Princípios e Diretrizes**. Rio de Janeiro, 2009. 24 p. SPANISH NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS (SPANCOLD). Risk analysis applied to management of dam safety. SPANCOLD, 2013, 153 p.

BALBI, D. A. F. **Metodologias para a elaboração de planos de ações emergenciais para inundações induzidas por barragens: estudo de caso: Barragem de Peti - MG**. Dissertação. Mestrado. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

BRASIL. Lei n.º 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 40 da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000.

BUDWEG, F. M. G. **Critérios de Segurança para Reabilitação de Barragens**. 1991. XIX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Aracaju - SE.

DEPARTMENT OF DEFENSE – UNITED STATES OF AMERICA (DOD). **Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis - Rev A**. 1980. Washington, DC.

ELETROBRÁS. **Critérios de Projetos Cíveis de Usinas Hidrelétricas**. Centrais hidrelétricas brasileiras S. A. Eletrobrás, 2003.

ESPÓSITO, T.; PALMIER L. R. **Application of risk analysis methods on tailings dams. Soils and Rocks**, São Paulo, v. 36, n. 1, p. 97-117, jan-abr. 2013.

FOSTER, M.; FELL, R. **A framework for estimating the probability of embankment dams by internal erosion and piping using event tree methods**. UNICIV Report No R-377, School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales. ISBN 85841 344 2, Sydney, Austrália, 1999.

FUSARO, T. C. **Um Programa de Segurança de Barragens no Setor Elétrico Privatizado**. 1997. XXII - Seminário Nacional de Grandes Barragens São Paulo – SP.

HARTFORD, D. N. D.; BAECHER G. B. **Risk and uncertainty in dam safety – CEA Technologies Dam Safety Interest Group**. ISBN 0 7277 3270 6, Londres, Inglaterra: Thomas Telford Publishing, 2004. 391 p.

HSE (Health and Safety Executive, United Kingdom). **Generic Terms and Concepts in the Assessment and Regulation of Industrial Risks**. Health and Safety Executive, Her Majesty's Stationery Office, London, UK, 1995.

ICOLD. **Risk Assessment in Dam Safety Management: A Reconnaissance of Benefits, Methods and Current Applications – Bulletin 130**. Paris, 2005.

ICOLD. **Risk Assessment in Dam Safety Management: A Reconnaissance of Benefits, Methods and Current Applications – Bulletin 130**. Paris, 2005.

MELO, A. V. & FUSARO, T. C. **Avaliação de Métodos de Análise de Riscos Aplicados a Barragens**. 2015. XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Foz do Iguaçu – PR.

MELO, A. V. **Análises de Risco Aplicadas a Barragens de Terra e Enrocamento: Estudo de Caso de Barragens da CEMIG GT**. Universidade federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG, 2014.

MORRIS, M.; HEWLETT, H. e ELLIOT, C. **“Risk and reservoir in the UK. Proceedings of the International Seminar and Workshop “Risk Assessment, Dam-break flood analysis and Emergency Action Planning”**. 2000. Finnish Environment Institute, Seinäjoki, Finland, 2000.

PIMENTA, M. L. B. **Abordagens de riscos em barragens de aterro**. 2009. Lisboa: LNEC, 2009. 570 p.

PENNA, D. C. R. ARAGÃO, G. A. S. & FUSARO, T. C. **Complementariedade entre o Monitoramento e Análises de Risco na Gestão da Segurança de Barragens**. 2015. XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Foz do Iguaçu – PR

RETTEMEIER, K. NILKENS, B. FALKENHAGEN, B. & JUNGEN KONTEGER, 2002. **New Developments in Dam Safety. Feasibility Evaluation on Risk Assessment**. apud PIMENTA, M. L. B. **Abordagens de riscos em barragens de aterro**. 2009. Lisboa: LNEC, 2009. 570 p.

SALMON, G.M.; HARTFORD, D.N.D.; 1995. **Risk analysis for dam safety**. **International Water Power & Dam Construction**, March, p. 42 – 47 apud MENESCAL, R.A.; VIEIRA, V.P.P.B, A.S. & OLIVEIRA, S.K.F.; 2001. **Terminologia para Análise de Risco e Segurança de Barragens**. XIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Anais, Fortaleza – Ce.

VIANNA, L. F. V. **Metodologias de Análise de Risco Aplicadas em Planos de Ação de Emergência de Barragens: Auxílio ao Processo de Tomada de Decisão**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG, 2015.

WISEU, T. & ALMEIDA, A. B. **Gestão do Risco nos Vales de Jusante de Barragens**. II Congresso Internacional de Riscos e VI Encontro Nacional, 2010. Lisboa, PT.

WISEU, M. T. et al. **Riscos Naturais, Antrópicos e Mistos**. 2013. Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal.

VEIGA PINTO. A. **Gestão de Riscos e Segurança de Barragens**. 2008. LNEC. 3º Simpósio de Segurança de Barragens e Riscos Associados.

6 - Apêndice

Função	Modo de Falha	Efeito Final	S	Causa	O	Crit.	Controle	D	NPR			
1. Barragem de Terra - Margem Esquerda												
1.1. Seção "E"												
Conter o reservatório	1.1.(1)	Galgamento	Erosão do talude de jusante e abertura de brecha	9	V	Borda livre insuficiente devido a abatimento da crista	2	II	18	Alteamento da crista para atender a borda livre d projeto	2	36
						Vazão afluente superior a capacidade de descarga do vertedouro	3	II	27	Monitoramento da vazões afluentes/ deplecionamento do resrvatório	3	81
						Falha nas comportas do vertedouro, ocasionando a sobrelevação do lago	3	II	27	Manutenção das comportas e testes frequentes	3	81
						Formação de onda no reservatório devido a escorregamento de taludes	2	II	18	Monitoramento de taludes no lago do reservatório que possam colapsar.	4	72
						Falha de projeto (erro no dimensionamento da vazão de projeto ou na capacidade do vertedouro)	2	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	54
	1.1.(2)	Movimento de massa	Instabilidade global da estrutura, com liberação descontrolada de água	10	VI	Carregamentos excepcionais	3	II	30	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	90
					I	Falha de projeto ou construção	3	II	30	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	90
					I	Propriedades inadequadas dos materiais	3	II	30	Substituição do material/ construção de bermas estabilizadoras	3	90

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S	Causa	O	Crit.	Controle	D	NPR
					I	Aumento da subpressão e consequente redução da tensão efetiva	2 II 20	Monitoramento com piezômetros/ execução de estruturas de alívio ou bermas estabilizadoras	3	60
					I	Abalos sísmicos	2 II 20	Monitoramento por acelerômetros/ redução do impacto pelo deplecionamento do lago ou construção de bermas estabilizadoras	3	60
					I	Terrorismo/ sabotagem	3 II 30	Restrição de acesso à área da barragem	2	60
	1.1.(3)	Erosão interna	Formação de piping com ruptura da barragem	9	V	Falha de projeto ou construção	3 II 27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	81
					I	Abertura de fissuras e trincas internas	4 III 36	Monitoramento com instrumentação e inspeção visual de surgências, construção de sistemas de filtro	3	108
					I	Percolação ou poropressão elevada atingindo a face de jusante	3 II 27	Inspeção visual/ monitoramento e construção de poços de alívio ou bermas estabilizadoras	3	81
					I	Abertura de caminho preferencial por raízes e tocas de animais	3 II 27	Limpeza regular da região da barragem	2	54
					I	Granulometria inadequada do material	3 II 27	Monitoramento com instrumentação e inspeção visual de surgências, construção de sistemas de filtro	3	81

Função	Modo de Falha	Efeito Final	S	Causa	O	Crit.	Controle	D	NPR
1.1.1.1. Crista									
Manter a borda livre	1.1.1.1.(1)	Deformação excessiva	Abatimento da crista sem perda da borda livre de projeto	2	II		Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico		24
			Abatimento da crista com perda da borda livre, com galgamento e erosão externa, ocorrendo a ruptura	9	V	Recalques (inadequação de projeto ou construção)		3	108
	1.1.1.1.(2)	Abertura de fissuras transversais	Abertura de fissuras transversais, permitindo a passagem de água do reservatório e evoluindo para uma brecha	9	V	Recalques diferenciais (mudança brusca de seção ou de módulo de elasticidade de materiais)		3	81
Permitir o acesso às estruturas	1.1.1.1.(3)	Obstrução do acesso	Perda do acesso às estruturas	2	II	Deformações excessivas		2	16
1.1.1.2. Espaldar Jusante									
Manter a estabilidade mecânica	1.1.1.2.(1)	Instabilidades associadas a movimento de massa	Instabilidade local (abatimentos ou depressões), podendo ser progressiva se não tratada	5	III	Erro de projeto (propriedades dos materiais)		3	45
					I	Erro de construção (compactação)		3	45
			Instabilidade global	10	VI	Erro de projeto (propriedades dos materiais)		3	90
					I	Erro de construção (compactação)		3	90

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
Proteger o talude de jusante contra erosão	1.1.2.(2)	Perda da proteção vegetal	Erosão superficial devido à ocorrência de precipitação	1	I	Retirada da proteção vegetal	6	III	6	Recomposição da proteção vegetal	1	6
1.1.3. Espaldar Montante												
Manter a estabilidade mecânica	1.1.3.(1)	Instabilidades associadas a movimento de massa	Instabilidade local (abatimentos ou depressões), podendo ser progressiva se não tratada	5	III	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	15	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	45
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	15	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	45
		Instabilidade global	10	VI	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	30	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	90	
				I	Erro de construção (compactação)	3	II	30	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	90	
1.1.3.1. Rip-Rap												
Proteção do espaldar de montante contra ondas e flutuação no nível operativo do reservatório	1.1.3.1.(1)	Perda da proteção de enrocamento	Erosão com instabilidade local	5	I	Degradação do material do rip-rap	6	III	30	Recomposição do rip-rap	2	60
						Deslocamento pela ação das ondas	4	III	20		2	40
						Movimentação por colapso	3	II	15		2	30
						Movimentação por fluência	3	II	15		2	30
					Erros de projeto/ construção	3	II	15	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	2	30	
1.1.4. Aterro Compactado												
Manter a estabilidade mecânica	1.1.4.(1)	Instabilidade devido a movimento de	Instabilidade local da barragem	6	IV	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	54

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S	Causa		O	Crit.	Controle	D	NPR			
		massa			I	Erro de construção (compactação)	3	II	18	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	54		
					I	Carregamento excepcional (rebaixamento rápido)	4	III	24	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	72		
			Instabilidade global da barragem	10	VI	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	30	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	90		
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	30	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	90		
					I	Percolação ou poropressão elevada	4	III	40	Inspeção visual/ monitoramento e construção de poços de alívio ou bermas estabilizadoras	3	120		
					I	Carregamento excepcional (rebaixamento rápido)	4	III	40	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	120		
			1.1.4.(2)	Deformação excessiva	Fissuração com instabilidade local	4	III	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	12	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	36
							I	Erro de construção (compactação)	3	II	12	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	36
	Fissuração com instabilidade global e ruptura	9			V	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	81		

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S	Causa		O	Crit.	Controle	D	NPR	
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	27	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	81
					I	Percolação ou poropressão elevada	4	III	36	Inspeção visual/ monitoramento e construção de poços de alívio ou bermas estabilizadoras	3	108
			Galgamento	9	V	Recalque excessivo (erro de projeto ou de construção)	3	II	27	Alteamento da estrutura do aterro	3	81
Aumentar o caminho de percolação, reduzindo o gradiente hidráulico	1.1.4.(3)	Percolação excessiva	Erosão regressiva com piping	9	V	Aumento da poropressão devido a falha no filtro	4	III	36	Prever projeto de poços de alívio ou sistema de drenagem para alívio da subpressão/ inspeção e monitoramento	3	108
					I	Fissuração interna devido a recalques excessivos ou recalques diferenciais entre seções	4	III	36	Monitoramento por instrumentação/ injeção ou construção de sistemas de filtro e drenagem	3	108
1.1.4.1. Interface Aterro-Filtro												
Controle da percolação sem carreamento de material da barragem	1.1.4.1.(1)	Perda da função de filtro do material do aterro (carreamento de material)	Carreamento de material com formação de piping e ruptura	9	V	Granulometria do material do filtro inadequada (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	81
				8	IV			I	24	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular		72
	1.1.4.1.(2)	Colmatção da interface do filtro	Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade local da barragem	6	IV	Granulometria do material do filtro inadequada (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	54
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	24	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	72

[illegible]

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
Conduzir as águas percoladas no corpo do aterro ao filtro horizontal	1.1.5.1.(1)	Perda da permeabilidade	Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade local da barragem	6	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	54
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatação do filtro	4	III	24	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	72
			Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade global da barragem, levando à ruptura	8	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	24	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	72
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatação do filtro	4	III	32	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	96
			Aumento da poropressão, com nível freático atingindo a face de jusante, com carreamento de material e piping	9	V	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	81
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatação do filtro	4	III	36	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	108
1.1.5.2. Filtro Horizontal												

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
Conduzir as águas percoladas pelo aterro e pela fundação ao dreno de pé.	1.1.5.2.(1)	Perda da permeabilidade	Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade local da barragem	6	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	54
						Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	24	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	72
			Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade global da barragem, levando à ruptura	8	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	24	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	72
						Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	32	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	96
			Aumento da poropressão, com nível freático atingindo a face de jusante, com carreamento de material e piping (ruptura)	9	V	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	81
						Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	36	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	108

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O			Crit.	Controle	D	NPR
			Aumento da poropressão na fundação, aumentando o gradiente hidráulico no pé do aterro, causando a ruptura	8	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	24	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	72	
						Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	32	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	96	
	1.1.5.2.(2)	Carreamento de material	Erosão regressiva e piping no aterro, causando a ruptura da barragem	9	V	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	81	
			Erosão regressiva e piping na fundação, causando a ruptura da barragem	9	V	3	II	27	3		81		
1.1.5.3. Dreno de Pé													
Conduzir as águas percoladas pelo aterro e fundação até a seção de saída do sistema de drenagem	1.1.5.3.(1)	Obstrução da saída do dreno (afogamento ou colmatção)	Aumento da poropressão no aterro devido ao represamento, causando redução da tensão efetiva e instabilidade local da barragem	6	IV	Granulometria inadequada (erro de projeto)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	54	
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	24	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	4	96	
					I	Escolha da seção de saída do escoamento inadequada	2	II	12	Alteração do sistema de lançamento das águas percoladas no maciço	3	36	
			8	IV	Granulometria inadequada (erro de projeto)	3	II	24	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	72		
				I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	32	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	96		

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
					I	Escolha da seção de saída do escoamento inadequada	2	II	16	Alteração do sistema de lançamento das águas percoladas no maciço	3	48
			Aumento da poropressão, com nível freático atingindo a face de jusante, com carreamento de material e piping (ruptura)	9	V	Granulometria inadequada (erro de projeto)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	81
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	36	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	108
					I	Escolha da seção de saída do escoamento inadequada	2	II	18	Alteração do sistema de lançamento das águas percoladas no maciço	3	54
			Aumento da poropressão na fundação, aumentando o gradiente hidráulico no pé do aterro, causando a ruptura	8	IV	Granulometria inadequada (erro de projeto)	3	II	24	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	72
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	32	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	96
					I	Escolha da seção de saída do escoamento inadequada	2	II	16	Alteração do sistema de lançamento das águas percoladas no maciço	3	48
			1.1.6. Reaterro									
Recompor o corte no pé de jusante do aterro	1.1.6.(1)	Deformação excessiva	Abatimento da superfície recomposta	2	II	Escolha de material inadequado (erro de projeto) ou compactação ineficiente (erro de construção)	4	III	8	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	24
	1.1.6.(2)	Percolação	Instabilidade local pelo carreamento de material	4	III	Falha no sistema de drenagem interna	2	II	8		3	24
1.1.7. Cut-off												

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O			Crit.	Controle	D	NPR
Aumentar o caminho de percolação pela fundação da barragem	1.1.7.(1)	Perda da função de vedação (percolação excessiva)	Fissuração e aumento da percolação, com formação de piping e ruptura	9	I	Interceptação ineficiente da camada permeável da fundação (erro de projeto)	4	III	36	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	108	
	1.1.7.(2)	Deformação				Falta de compactação, gerando deformações excessivas	4	III	36	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	108	
1.1.8. Fundação													
Controle da percolação sob a barragem	1.1.8(1)	Erosão interna	Piping	9	V	Aspectos geológicos não identificados (resistência insuficiente ou ocorrência geológica)	2	II	18	Aumento da investigação dos materiais geotécnicos/ inspeção e monitoramento por instrumentação	6	108	
						Percolação excessiva de água, com carreamento de material	5	III	45	Execução de poços de aívio/ monitoramento e inspeção visual	3	135	
1.1.8.1. Interface Barragem-Fundação													
Controle da percolação e regularização da fundação do aterro de montante	1.1.8.1.(1)	Deformação excessiva	Sinkhole, com formação de piping	9	V	Limpeza da fundação mal-sucedida deixando vazios com carreamento de material	3	II	27	Rebaixamento do lago e recomposição da subsidência	4	108	
1.1.8.2. Instrumentação da Fundação (brecha basáltica arenosa)													
Monitorar a percolação na brecha basáltica, abaixo da	1.1.8.2.(1)	Falha nos piezômetros	Impossibilidade de monitoramento da estrutura	5	III	Excesso de finos no aterro ou fundação	6	III	30	Limpeza dos piezômetros	3	90	

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O			Crit.	Controle	D	NPR
camada de basalto denso													
1.2. Seção "F"													
Conter o reservatório	1.2.(1)	Galgamento	Erosão do talude de jusante e abertura de brecha	9	V	Borda livre insuficiente devido a abatimento da crista	2	II	18	Alteamento da crista para atender a borda livre d projeto	2	36	
					I	Vazão afluyente superior a capacidade de descarga do vertedouro	2	II	18	Monitoramento da vazões afluentes/ deplecionamento do resrvatório	3	54	
					I	Falha nas comportas do vertedouro, ocasionando a sobrelevação do lago	3	II	27	Manutenção das comportas e testes frequentes	3	81	
					I	Formação de onda no reservatório devido a escorregamento de taludes	3	II	27	Monitoramento de taludes no lago do reservatório que possam colapsar.	4	108	
					I	Falha de projeto (erro no dimensionamento da vazão de projeto ou na capacidade do vertedouro)	2	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	54	
	1.2.(2)	Movimento de massa	Instabilidade global da estrutura, com liberação descontrolada de água	10	VI	Carregamentos excepcionais	4	III	40	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	120	
					I	Falha de projeto ou construção	3	II	30	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	90	
					I	Propriedades inadequadas dos materiais	3	II	30	Substituição do material/ construção de bermas estabilizadoras	3	90	

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S	Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR	
				9	I	Aumento da subpressão e consequente redução da tensão efetiva	2	II	20	Monitoramento com piezômetros/ execução de estruturas de alívio ou bermas estabilizadoras	3	60
					I	Abalos sísmicos	2	II	20	Monitoramento por acelerômetros/ redução do impacto pelo deplecionamento do lago ou construção de bermas estabilizadoras	3	60
					I	Terrorismo/ sabotagem	2	II	20	Restrição de acesso à area da barragem	2	40
	1.2.(3)	Erosão interna	Formação de piping com ruptura da barragem	9	V	Falha de projeto ou construção	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	81
					I	Abertura de fissuras e trincas internas	2	II	18	Monitoramento com instrumentação e inspeção visual de surgências, construção de sistemas de filtro	3	54
					I	Percolação ou poropressão elevada atingindo a face de jusante	2	II	18	Inspeção visual/ monitoramento e construção de poços de alívio ou bermas estabilizadoras	3	54
					I	Abertura de caminho preferencial por raízes e tocas de animais	3	II	27	Limpeza regular da região da barragem	2	54
					I	Granulometria inadequada do material	3	II	27	Monitoramento com instrumentação e inspeção visual de surgências, construção de sistemas de filtro	3	81
1.2.1. Crista												

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
Manter a borda livre	1.2.1.(1)	Deformação excessiva	Abatimento da crista sem perda da borda livre de projeto	2	II	Recalques (inadequação de projeto ou construção)	4	III	8	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	24
			Abatimento da crista com perda da borda livre, com galgamento e erosão externa, ocorrendo a ruptura	9	V				36	Selagem de trincas e recompactação		108
	1.2.1.(2)	Abertura de fissuras transversais	Abertura de fissuras transversais, permitindo a passagem de água do reservatório e evoluindo para uma brecha	9	V	Recalques diferenciais (mudança brusca de seção ou de módulo de elasticidade de materiais)	3	II	27	Abrandamento dos taludes íngremes/ monitoramento e inspeções visuais	3	81
Permitir o acesso às estruturas	1.2.1.(3)	Obstrução do acesso	Perda do acesso às estruturas	2	II	Deformações excessivas	4	III	8	Alteamento da crista	2	16
1.2.2. Espaldar Jusante												
Manter a estabilidade mecânica	1.2.2.(1)	Instabilidades associadas a movimento de massa	Instabilidade local (abatimentos ou depressões), podendo ser progressiva se não tratada	5	III	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	15	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	45
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	15	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	45
			Instabilidade global	10	VI	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	30	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	90
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	30	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	90

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O			Crit.	Controle	D	NPR
Proteger o talude de jusante contra erosão	1.2.2.(2)	Perda da proteção vegetal	Erosão superficial devido à ocorrência de precipitação	1	I	Retirada da proteção vegetal	6	III	6		Recomposição da proteção vegetal	1	6
1.2.3. Espaldar Montante													
Manter a estabilidade mecânica	1.2.3.(1)	Instabilidades associadas a movimento de massa	Instabilidade local (abatimentos ou depressões), podendo ser progressiva se não tratada	5	III	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	15		Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	45
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	15		Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	45
			Instabilidade global	10	VI	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	30		Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	90
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	30		Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	90
1.2.3.1. Rip-Rap													
Proteção do espaldar de montante contra ondas e flutuação no nível operativo do reservatório	1.2.3.(2)	Perda da proteção de enrocamento	Erosão com instabilidade local	5	I	Degradação do material do rip-rap	6	III	30		Recomposição do rip-rap	2	60
						Deslocamento pela ação das ondas	4	III	20			2	40
						Movimentação por colapso	3	II	15			2	30
						Movimentação por fluência	3	II	15			2	30
						Erros de projeto/ construção	3	II	15		Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	2	30
1.2.4. Aterro Compactado													

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S	Causa		O	Crit.	Controle	D	NPR	
Manter a estabilidade mecânica	1.2.4.(1)	Instabilidade devido a movimento de massa	Instabilidade local da barragem	6	IV	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	54
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	18	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	54
					I	Carregamento excepcional (rebaixamento rápido)	4	III	24	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	72
			Instabilidade global da barragem	10	VI	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	30	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	90
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	30	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	90
					I	Percolação ou poropressão elevada	2	II	20	Inspeção visual/ monitoramento e construção de poços de alívio ou bermas estabilizadoras	3	60
	1.2.4.(2)	Deformação excessiva	Fissuração com instabilidade local	4	I	Carregamento excepcional (rebaixamento rápido)	4	III	40	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	120

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S	Causa		O	Crit.	Controle	D	NPR	
			Fissuração com instabilidade global e ruptura	9	V	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	81
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	27	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	81
					I	Percolação ou poropressão elevada	2	II	18	Inspeção visual/ monitoramento e construção de poços de alívio ou bermas estabilizadoras	3	54
			Galgamento	9	V	Recalque excessivo (erro de projeto ou de construção)	2	II	18	Alteamento da estrutura do aterro	3	54
Aumentar o caminho de percolação, reduzindo o gradiente hidráulico	1.2.4.(3)	Percolação excessiva	Erosão regressiva com piping	9	V	Aumento da poropressão devido a falha no filtro	2	II	18	Prever projeto de poços de alívio ou sistema de drenagem para alívio da subpressão/ inspeção e monitoramento	3	54
					I	Fissuração interna devido a recalques excessivos ou recalques diferenciais entre seções	2	II	18	Monitoramento por instrumentação/ injeção ou construção de sistemas de filtro e drenagem	3	54
1.2.4.1. Interface Aterro-Filtro												
Controle da percolação sem carreamento de material da barragem	1.2.4.1.(1)	Perda da função de filtro do material do aterro (carreamento de material)	Carreamento de material com formação de piping e ruptura	9	V	Granulometria do material do filtro inadequada (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	81
			Carreamento de material com formação de sinkholes	8	IV			I	24	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular		72
	1.2.4.1.(2)	Colmatação da interface do filtro	Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade local da barragem	6	IV	Granulometria do material do filtro inadequada (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	54

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	3	II	18	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	54
			Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade global da barragem, levando à ruptura	10	VI	Granulometria do material do filtro inadequada (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	30	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	90
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	3	II	30	Aumento da investigação dos materiais geotécnicos/ inspeção e monitoramento por instrumentação	3	90
1.2.5. Sistema de Drenagem Interna												
Conduzir as águas percoladas no aterro ao dreno de pé sem elevação da pressão neutra	1.2.5.(1)	Perda da permeabilidade	Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade local da barragem	6	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	54
			Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade global da barragem, levando à ruptura	8	IV				24	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	72
			Aumento da poropressão, com nível freático atingindo a face de jusante, com carreamento de material e piping	9	V				27		3	81
1.2.5.1. Filtro Vertical												

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
Conduzir as águas percoladas no corpo do aterro ao filtro horizontal	1.2.5.1.(1)	Perda da permeabilidade	Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade local da barragem	6	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	54
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	24	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	72
			Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade global da barragem, levando à ruptura	8	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	24	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	72
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	32	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	96
			Aumento da poropressão, com nível freático atingindo a face de jusante, com carreamento de material e piping	9	V	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	81
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	36	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	108
1.2.5.2. Filtro Horizontal												

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa		O	Crit.	Controle	D	NPR
Conduzir as águas percoladas pelo aterro e pela fundação ao dreno de pé.	1.2.5.2.(1)	Perda da permeabilidade	Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade local da barragem	6	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	54
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	24	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	72
			Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade global da barragem, levando à ruptura	8	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	24	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	72
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	32	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	96
			Aumento da poropressão, com nível freático atingindo a face de jusante, com carreamento de material e piping (ruptura)	9	V	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	81
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	36	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	108

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O			Crit.	Controle	D	NPR
			Aumento da poropressão na fundação, aumentando o gradiente hidráulico no pé do aterro, causando a ruptura	8	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	24	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompressão, se necessário	3	72	
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatagem do filtro	4	III	32		Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	96
	1.2.5.2.(2)	Carreamento de material	Erosão regressiva e piping no aterro, causando a ruptura da barragem	9	V	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompressão, se necessário	3	81	
			Erosão regressiva e piping na fundação, causando a ruptura da barragem	9	V		3	II	27		3	81	
1.2.5.3. Dreno de Pé													
Conduzir as águas percoladas pelo aterro e fundação até a seção de saída do sistema de drenagem	1.2.5.3.(1)	Obstrução da saída do dreno (afogamento ou colmatagem)	Aumento da poropressão no aterro devido ao represamento, causando redução da tensão efetiva e instabilidade local da barragem	6	IV	Granulometria inadequada (erro de projeto)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	54	
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatagem do filtro	4	III	24	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	72	
					I	Escolha da seção de saída do escoamento inadequada	2	II	12	Alteração do sistema de lançamento das águas percoladas no maciço	3	36	
			Aumento da poropressão no aterro devido ao represamento, causando redução da tensão efetiva e instabilidade global da barragem	8	IV	Granulometria inadequada (erro de projeto)	3	II	24	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	72	
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatagem do filtro	4	III	32	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	96	

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
					I	Escolha da seção de saída do escoamento inadequada	2	II	16	Alteração do sistema de lançamento das águas percoladas no maciço	3	48
			Aumento da poropressão, com nível freático atingindo a face de jusante, com carreamento de material e piping (ruptura)	9	V	Granulometria inadequada (erro de projeto)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	81
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	36	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	108
					I	Escolha da seção de saída do escoamento inadequada	2	II	18	Alteração do sistema de lançamento das águas percoladas no maciço	3	54
			Aumento da poropressão na fundação, aumentando o gradiente hidráulico no pé do aterro, causando a ruptura	8	IV	Granulometria inadequada (erro de projeto)	3	II	24	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	72
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	32	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	96
					I	Escolha da seção de saída do escoamento inadequada	2	II	16	Alteração do sistema de lançamento das águas percoladas no maciço	3	48
			1.2.6. Reaterro									
Recompôr o corte no pé de jusante do aterro	1.2.6.(1)	Deformação excessiva	Abatimento da superfície recomposta	2	II	Escolha de material inadequado (erro de projeto) ou compactação ineficiente (erro de construção)	4	III	8	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	2	16
	1.2.6.(2)	Percolação	Instabilidade local pelo carreamento de material	4	III	Falha no sistema de drenagem interna	2	II	8	Execução de poços de aívio/ monitoramento e inspeção visual	4	32
1.2.7. Fundação												

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
Controle da percolação sob a barragem	1.2.7.(1)	Erosão interna	Piping	9	V	Percolação excessiva de água, com carreamento de material	2	II	18	Execução de poços de aívio/ monitoramento e inspeção visual	3	54
					Aspectos geológicos não identificados (resistência insuficiente ou ocorrência geológica)	2	II	18	Aumento da investigação dos materiais geotécnicos/ inspeção e monitoramento por instrumentação	5	90	
1.2.7.1. Interface Barragem-Fundação												
Controle da percolação e regularização da fundação do aterro de montante	1.2.7.1.(1)	Deformação excessiva	Sinkhole, com formação de piping	8	IV	Limpeza da fundação mal-sucedida deixando vazios com carreamento de material	3	II	24	Rebaixamento do lago e recomposição da subsidência	3	72
1.2.7.2. Instrumentação da Fundação (brecha basáltica arenosa)												
Monitorar a percolação na brecha basáltica, abaixo da camada de basalto denso	1.2.7.2.(1)	Falha nos piezômetros	Impossibilidade de monitoramento da estrutura	5	III	Excesso de finos no aterro ou fundação	3	II	15	Limpeza dos piezômetros	3	45
2. Barragem de Terra - Margem direita												
2.1. Seção "B"												
Conter o reservatório	2.1.(1)	Galgamento	Erosão do talude de jusante e abertura de brecha	9	V	Borda livre insuficiente devido a abatimento da crista	2	II	18	Alteamento da crista para atender a borda livre d projeto	2	36
					I	Vazão afluente superior a capacidade de descarga do vertedouro	2	II	18	Monitoramento da vazões afluentes/ deplecionamento do resrvatório	3	54

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S	Causa	O	Crit.	Controle	D	NPR		
				I	Falha nas comportas do vertedouro, ocasionando a sobrelevação do lago	3	II	27	Manutenção das comportas e testes frequentes	3	81	
					Formação de onda no reservatório devido a escorregamento de taludes	3	II	27	Monitoramento de taludes no lago do reservatório que possam colapsar.	4	108	
					Falha de projeto (erro no dimensionamento da vazão de projeto ou na capacidade do vertedouro)	2	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	54	
	2.1.(2)	Movimento de massa	Instabilidade global da estrutura, com liberação descontrolada de água	10	VI	Carregamentos excepcionais	4	III	40	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	120
					I	Falha de projeto ou construção	3	II	30	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	90
					I	Propriedades inadequadas dos materiais	3	II	30	Substituição do material/ construção de bermas estabilizadoras	3	90
					I	Aumento da subpressão e consequente redução da tensão efetiva	4	III	40	Monitoramento com piezômetros/ execução de estruturas de alívio ou bermas estabilizadoras	3	120
					I	Abalos sísmicos	2	II	20	Monitoramento por acelerômetros/ redução do impacto pelo deplecionamento do lago ou construção de bermas estabilizadoras	3	60
					I	Terrorismo/ sabotagem	2	II	20	Restrição de acesso à area da barragem	2	40
	2.1.(3)	Erosão interna	Formação de piping com ruptura da barragem	9	V	Falha de projeto ou construção	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	81

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
					I	Abertura de fissuras e trincas internas	4	III	36	Monitoramento com instrumentação e inspeção visual de surgências, construção de sistemas de filtro	3	108
					I	Percolação ou poropressão elevada atingindo a face de jusante	4	III	36	Inspeção visual/ monitoramento e construção de poços de alívio ou bermas estabilizadoras	3	108
					I	Abertura de caminho preferencial por raízes e tocas de animais	3	II	27	Limpeza regular da região da barragem	2	54
					I	Granulometria inadequada do material	3	II	27	Monitoramento com instrumentação e inspeção visual de surgências, construção de sistemas de filtro	3	81
2.1.1. Crista												
Manter a borda livre	2.1.1.(1)	Deformação excessiva	Abatimento da crista sem perda da borda livre de projeto	2	II	Recalques (inadequação de projeto ou construção)	4	III	8	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	24
			Abatimento da crista com perda da borda livre, com galgamento e erosão externa, ocorrendo a ruptura	9	V			I	36	Selagem de trincas e recompactação		108
	2.1.1.(2)	Abertura de fissuras transversais	Abertura de fissuras transversais, permitindo a passagem de água do reservatório e evoluindo para uma brecha	9	V	Recalques diferenciais (mudança brusca de seção ou de módulo de elasticidade de materiais)	3	II	27	Abrandamento dos taludes íngremes/ monitoramento e inspeções visuais	3	81

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
Permitir o acesso às estruturas	2.1.1.(3)	Obstrução do acesso	Perda do acesso às estruturas	2	II	Deformações excessivas	4	III	8	Alteamento da crista	2	16
2.1.2. Espaldar Jusante												
Manter a estabilidade mecânica	2.1.2.(1)	Instabilidades associadas a movimento de massa	Instabilidade local (abatimentos ou depressões), podendo ser progressiva se não tratada	5	III	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	15	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	45
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	15	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	45
			Instabilidade global	10	VI	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	30	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	90
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	30	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	90
Proteger o talude de jusante contra erosão	2.1.2.(2)	Perda da proteção vegetal	Erosão superficial devido à ocorrência de precipitação	1	I	Retirada da proteção vegetal	6	III	6	Recomposição da proteção vegetal	1	6
2.1.3. Espaldar Montante												
Manter a estabilidade mecânica	2.1.3.(1)	Instabilidades associadas a movimento de massa	Instabilidade local (abatimentos ou depressões), podendo ser progressiva se não tratada	5	III	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	15	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	45
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	15	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	45
			Instabilidade global	10	VI	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	30	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	90

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	30	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	90
2.1.3.1. Rip-Rap												
Proteção do espaldar de montante contra ondas e flutuação no nível operativo do reservatório	2.1.3.1.(1)	Perda da proteção de enrocamento	Erosão com instabilidade local	5	I	Degradação do material do rip-rap	6	III	30	Recomposição do rip-rap	2	60
						Deslocamento pela ação das ondas	4	III	20		2	40
						Movimentação por colapso	3	II	15		2	30
						Movimentação por fluência	3	II	15		2	30
					Erros de projeto/ construção	3	II	15	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	2	30	
2.1.4. Aterro Compactado												
Manter a estabilidade mecânica	2.1.4.(1)	Instabilidade devido a movimento de massa	Instabilidade local da barragem	6	IV	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	54
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	18	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	54
					I	Carregamento excepcional (rebaixamento rápido)	4	III	24	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	72
		Instabilidade global da barragem	10	VI	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	30	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	90	

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S	Causa	O	Crit.	Controle	D	NPR		
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	30	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	90
					I	Percolação ou poropressão elevada	4	III	40	Inspeção visual/ monitoramento e construção de poços de alívio ou bermas estabilizadoras	3	120
					I	Carregamento excepcional (rebaixamento rápido)	4	III	40	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	120
	2.1.4.(2)	Deformação excessiva	Fissuração com instabilidade local	4	III	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	12	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	36
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	12	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	36
			Fissuração com instabilidade global e ruptura	9	V	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	81
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	27	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	81
					I	Percolação ou poropressão elevada	4	III	36	Inspeção visual/ monitoramento e construção de poços de alívio ou bermas estabilizadoras	3	108
			Galgamento	9	V	Recalque excessivo (erro de projeto ou de construção)	4	III	36	Alteamento da estrutura do aterro	3	108
Aumentar o caminho de	2.1.4.(3)	Percolação excessiva	Erosão regressiva com piping	9	V	Aumento da poropressão devido a falha no filtro	4	III	36	Prever projeto de poços de alívio ou sistema de drenagem para alívio da subpressão/ inspeção e monitoramento	3	108

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
percolação, reduzindo o gradiente hidráulico					I	Fissuração interna devido a recalques excessivos ou recalques diferenciais entre seções	4	III	36	Monitoramento por instrumentação/ injeção ou construção de sistemas de filtro e drenagem	3	108
2.1.4.1. Interface Aterro-Filtro												
Controle da percolação sem carreamento de material da barragem	2.1.4.1.(1)	Perda da função de filtro do material do aterro (carreamento de material)	Carreamento de material com formação de piping e ruptura	9	V	Granulometria do material do filtro inadequada (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	81
			Carreamento de material com formação de sinkholes	8	IV			I	24	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular		72
	2.1.4.1.(2)	Colmatação da interface do filtro	Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade local da barragem	6	IV	Granulometria do material do filtro inadequada (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	54
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatação do filtro	4	III	24	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	72
			Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade global da barragem, levando à ruptura	10	VI	Granulometria do material do filtro inadequada (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	30	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	90
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatação do filtro	4	III	40	Aumento da investigação dos materiais geotécnicos/ inspeção e monitoramento por instrumentação	3	120
2.1.5. Sistema de Drenagem Interna												

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
Conduzir as águas percoladas no aterro ao dreno de pé sem elevação da pressão neutra	2.1.5.(1)	Perda da permeabilidade	Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade local da barragem	6	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	4	II	24	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	72
			Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade global da barragem, levando à ruptura	8	IV				Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	96	
			Aumento da poropressão, com nível freático atingindo a face de jusante, com carreamento de material e piping	9	V					3	108	
2.1.5.1. Filtro Vertical												
Conduzir as águas percoladas no corpo do aterro ao filtro horizontal	2.1.5.1.(1)	Perda da permeabilidade	Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade local da barragem	6	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompressão, se necessário	3	54
					I				Excesso de materiais finos, causando a colmatação do filtro	4	III	24
			Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade global da barragem, levando à ruptura	8	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	24	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompressão, se necessário	3	72

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	32	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	96
			Aumento da poropressão, com nível freático atingindo a face de jusante, com carreamento de material e piping	9	V	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	81
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	36	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	108
2.1.5.2. Filtro Horizontal												
Conduzir as águas percoladas pelo aterro e pela fundação ao dreno de pé.	2.1.5.2.(1)	Perda da permeabilidade	Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade local da barragem	6	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	54
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	24	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	72
			Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade global da barragem, levando à ruptura	8	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	24	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	72

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	32	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	96
			Aumento da poropressão, com nível freático atingindo a face de jusante, com carreamento de material e piping (ruptura)	9	V	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	81
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatação do filtro	4	III	36	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	108
			Aumento da poropressão na fundação, aumentando o gradiente hidráulico no pé do aterro, causando a ruptura	8	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	24	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	72
	I	Excesso de materiais finos, causando a colmatação do filtro			4	III	32	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	96		
	2.1.5.2.(2)	Carreamento de material	Erosão regressiva e piping no aterro, causando a ruptura da barragem	9	V	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	81
			Erosão regressiva e piping na fundação, causando a ruptura da barragem	9	V		3	II	27		3	81
	2.1.5.3. Dreno de Pé											

2.1.5.3. Dreno de Pé

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S	Causa		O	Crit.	Controle	D	NPR	
Conduzir as águas percoladas pelo aterro e fundação até a seção de saída do sistema de drenagem	2.1.5.3.(1)	Obstrução da saída do dreno (afogamento ou colmatção)	Aumento da poropressão no aterro devido ao represamento, causando redução da tensão efetiva e instabilidade local da barragem	6	IV	Granulometria inadequada (erro de projeto)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	54
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	24	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	72
					I	Escolha da seção de saída do escoamento inadequada	2	II	12	Alteração do sistema de lançamento das águas percoladas no maciço	3	36
			Aumento da poropressão no aterro devido ao represamento, causando redução da tensão efetiva e instabilidade global da barragem	8	IV	Granulometria inadequada (erro de projeto)	3	II	24	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	72
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	32	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	96
					I	Escolha da seção de saída do escoamento inadequada	2	II	16	Alteração do sistema de lançamento das águas percoladas no maciço	3	48
			Aumento da poropressão, com nível freático atingindo a face de jusante, com carreamento de material e piping (ruptura)	9	V	Granulometria inadequada (erro de projeto)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	81
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	36	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	108
					I	Escolha da seção de saída do escoamento inadequada	2	II	18	Alteração do sistema de lançamento das águas percoladas no maciço	3	54
			Aumento da poropressão na fundação, aumentando o gradiente hidráulico no pé do aterro, causando a ruptura	8	IV	Granulometria inadequada (erro de projeto)	3	II	24	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	72
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	32	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	96

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
					I	Escolha da seção de saída do escoamento inadequada	2	II	16	Alteração do sistema de lançamento das águas percoladas no maciço	3	48
2.1.6. Reaterro												
Permitir acesso às estruturas da eclusa e ombreira direita por jusante da barragem	2.1.6.(1)	Deformação excessiva	Abatimento da superfície	2	II	Escolha de material inadequado (erro de projeto) ou compactação ineficiente (erro de construção)	4	III	8	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	2	16
			Perda de acesso temporário	4	III		2	II	8	Recomposição da berma de acesso	3	24
2.1.7. Cut-off												
Aumentar o caminho de percolação pela fundação da barragem	2.1.7.(1)	Perda da função de vedação (percolação excessiva)	Fissuração e aumento da percolação, com formação de piping e ruptura	9	V	Interceptação ineficiente da camada permeável da fundação (erro de projeto)	4	III	36	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	108
	2.1.7.(2)	Deformação				Falta de compactação, gerando deformações excessivas	4	III	36	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	108
2.1.8. Fundação												
Controle da percolação sob a barragem	2.1.8.(1)	Erosão interna	Piping	9	V	Percolação excessiva de água, com carreamento de material	3	II	27	Execução de poços de aívio/ monitoramento e inspeção visual	3	81
						Aspectos geológicos não identificados (resistência insuficiente ou ocorrência geológica)	2	II	18	Aumento da investigação dos materiais geotécnicos/ inspeção e monitoramento por instrumentação	6	108

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle		D	NPR
2.1.8.1. Interface Barragem-Fundação													
Controle da percolação e regularização da fundação do aterro de montante	2.1.8.1.(1)	Deformação excessiva	Sinkhole, com formação de piping	8	IV	Limpeza da fundação mal-sucedida deixando vazios com carreamento de material	3	II	24	Rebaixamento do lago e recomposição da subsidência		3	72
2.1.8.2. Instrumentação da Fundação (brecha basáltica arenosa)													
Monitorar a percolação na brecha basáltica, abaixo da camada de basalto denso	2.1.8.2.(1)	Falha nos piezômetros	Impossibilidade de monitoramento da estrutura	5	III	Excesso de finos no aterro ou fundação	3	II	15	Limpeza dos piezômetros		3	45
2.2. Seção "C"													
Conter o reservatório	2.2.(1)	Galgamento	Erosão do talude de jusante e abertura de brecha	9	V	Borda livre insuficiente devido a abatimento da crista	2	II	18	Alteamento da crista para atender a borda livre d projeto		2	36
					I	Vazão afluyente superior a capacidade de descarga do vertedouro	2	II	18	Monitoramento da vazões afluentes/ deplecionamento do resrvatório		3	54
					I	Falha nas comportas do vertedouro, ocasionando a sobrelevação do lago	3	II	27	Manutenção das comportas e testes frequentes		3	81
					I	Formação de onda no reservatório devido a escorregamento de taludes	3	II	27	Monitoramento de taludes no lago do reservatório que possam colapsar.		4	108

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S	Causa	O	Crit.	Controle	D	NPR		
					I	Falha de projeto (erro no dimensionamento da vazão de projeto ou na capacidade do vertedouro)	2	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	54
	2.2.(2)	Movimento de massa	Instabilidade global da estrutura, com liberação descontrolada de água	10	VI	Carregamentos excepcionais	4	III	40	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	120
					I	Falha de projeto ou construção	3	II	30	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	90
					I	Propriedades inadequadas dos materiais	3	II	30	Substituição do material/ construção de bermas estabilizadoras	3	90
					I	Aumento da subpressão e consequente redução da tensão efetiva	3	II	30	Monitoramento com piezômetros/ execução de estruturas de alívio ou bermas estabilizadoras	3	90
					I	Abalos sísmicos	2	II	20	Monitoramento por acelerômetros/ redução do impacto pelo deplecionamento do lago ou construção de bermas estabilizadoras	3	60
					I	Terrorismo/ sabotagem	2	II	20	Restrição de acesso à area da barragem	2	40
	2.2.(3)	Erosão interna	Formação de piping com ruptura da barragem	9	V	Falha de projeto ou construção	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	81
					I	Abertura de fissuras e trincas internas	3	II	27	Monitoramento com instrumentação e inspeção visual de surgências, construção de sistemas de filtro	3	81

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
					I	Percolação ou poropressão elevada atingindo a face de jusante	3	II	27	Inspeção visual/ monitoramento e construção de poços de alívio ou bermas estabilizadoras	3	81
					I	Abertura de caminho preferencial por raízes e tocas de animais	3	II	27	Limpeza regular da região da barragem	2	54
					I	Granulometria inadequada do material	3	II	27	Monitoramento com instrumentação e inspeção visual de surgências, construção de sistemas de filtro	3	81
2.2.1. Crista												
Manter a borda livre	2.2.1.(1)	Deformação excessiva	Abatimento da crista sem perda da borda livre de projeto	2	II	Recalques (inadequação de projeto ou construção)	4	III	8	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	24
			Abatimento da crista com perda da borda livre, com galgamento e erosão externa, ocorrendo a ruptura	9	V			I	36	Selagem de trincas e recompactação		108
	2.2.1.(2)	Abertura de fissuras transversais	Abertura de fissuras transversais, permitindo a passagem de água do reservatório e evoluindo para uma brecha	9	V	Recalques diferenciais (mudança brusca de seção ou de módulo de elasticidade de materiais)	3	II	27	Abrandamento dos taludes íngremes/ monitoramento e inspeções visuais	3	81
Permitir o acesso às estruturas	2.2.1.(3)	Obstrução do acesso	Perda do acesso às estruturas	2	II	Deformações excessivas	4	III	8	Alteamento da crista	2	16
2.2.2. Espaldar Jusante												

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
Manter a estabilidade mecânica	2.2.2.(1)	Instabilidades associadas a movimento de massa	Instabilidade local (abatimentos ou depressões), podendo ser progressiva se não tratada	5	III	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	15	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	45
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	15	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	45
		Instabilidade global	10	VI	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	30	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	90	
				I	Erro de construção (compactação)	3	II	30	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	90	
Proteger o talude de jusante contra erosão	2.2.2.(2)	Perda da proteção vegetal	Erosão superficial devido à ocorrência de precipitação	1	I	Retirada da proteção vegetal	6	III	6	Recomposição da proteção vegetal	1	6
2.2.3. Espaldar Montante												
Manter a estabilidade mecânica	2.2.3.(1)	Instabilidades associadas a movimento de massa	Instabilidade local (abatimentos ou depressões), podendo ser progressiva se não tratada	5	III	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	15	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	45
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	15	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	45
		Instabilidade global	10	VI	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	30	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	90	
				I	Erro de construção (compactação)	3	II	30	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	90	
2.2.3.1. Rip-Rap												

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
Proteção do espaldar de montante contra ondas e flutuação no nível operativo do reservatório	2.2.3.1.(1)	Perda da proteção de enrocamento	Erosão com instabilidade local	5	I	Degradação do material do rip-rap	6	III	30	Recomposição do rip-rap e	2	60
						Deslocamento pela ação das ondas	4	III	20		2	40
						Movimentação por colapso	3	II	15		2	30
						Movimentação por fluência	3	II	15		2	30
					Erros de projeto/ construção	3	II	15	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	2	30	
2.2.4. Aterro Compactado												
Manter a estabilidade mecânica	2.2.4.(1)	Instabilidade devido a movimento de massa	Instabilidade local da barragem	6	IV	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	54
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	18	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	54
					I	Carregamento excepcional (rebaixamento rápido)	4	III	24	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	72
			Instabilidade global da barragem	10	VI	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	30	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	90
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	30	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	90
					I	Percolação ou poropressão elevada	3	II	30	Inspeção visual/ monitoramento e construção de poços de alívio ou bermas estabilizadoras	3	90

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
					I	Carregamento excepcional (rebaixamento rápido)	4	III	40	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	120
	2.2.4.(2)	Deformação excessiva	Fissuração com instabilidade local	4	III	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	12	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	36
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	12	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	36
			Fissuração com instabilidade global e ruptura	9	V	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	81
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	27	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	81
					I	Percolação ou poropressão elevada	3	II	27	Inspeção visual/ monitoramento e construção de poços de alívio ou bermas estabilizadoras	3	81
			Galgamento	9	V	Recalque excessivo (erro de projeto ou de construção)	3	II	27	Alteamento da estrutura do aterro	3	81
	Aumentar o caminho de percolação, reduzindo o gradiente hidráulico	2.2.4.(3)	Percolação excessiva	Erosão regressiva com piping	9	V	Aumento da poropressão devido a falha no filtro	3	II	27	Prever projeto de poços de alívio ou sistema de drenagem para alívio da subpressão/ inspeção e monitoramento	3
I	Fissuração interna devido a recalques excessivos ou recalques diferenciais entre seções	3	II			27	Monitoramento por instrumentação/ injeção ou construção de sistemas de filtro e drenagem	3	81			
2.2.4.1. Interface Aterro-Filtro												

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O	Crit.	Controle	D	NPR	
Controle da percolação sem carreamento de material da barragem	2.2.4.1.(1)	Perda da função de filtro do material do aterro (carreamento de material)	Carreamento de material com formação de piping e ruptura	9	V	Granulometria do material do filtro inadequada (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	81
			Carreamento de material com formação de sinkholes	8	IV			I	24	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular		72
	2.2.4.1.(2)	Colmatação da interface do filtro	Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade local da barragem	6	IV	Granulometria do material do filtro inadequada (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	54
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatação do filtro	3	II	18	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	54
			Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade global da barragem, levando à ruptura	10	VI	Granulometria do material do filtro inadequada (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	30	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	90
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatação do filtro	3	II	30	Aumento da investigação dos materiais geotécnicos/ inspeção e monitoramento por instrumentação	3	90
	2.2.5. Sistema de Drenagem Interna											
	Conduzir as águas percoladas no aterro ao dreno de pé sem	2.2.5.(1)	Perda da permeabilidade	Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade local da barragem	6	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
elevação da pressão neutra			Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade global da barragem, levando à ruptura	8	IV	construção)			24	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	72
			Aumento da poropressão, com nível freático atingindo a face de jusante, com carreamento de material e piping	9	V				27		3	81
2.2.5.1. Filtro Vertical												
Conduzir as águas percoladas no corpo do aterro ao filtro horizontal	2.2.5.1.(1)	Perda da permeabilidade	Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade local da barragem	6	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompressão, se necessário	3	54
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	24	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	72
			Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade global da barragem, levando à ruptura	8	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	24	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompressão, se necessário	3	72
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	32	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	96

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
			Aumento da poropressão, com nível freático atingindo a face de jusante, com carreamento de material e piping	9	V	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	81
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	36	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	108
2.2.5.2. Filtro Horizontal												
Conduzir as águas percoladas pelo aterro e pela fundação ao dreno de pé.	2.2.5.2.(1)	Perda da permeabilidade	Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade local da barragem	6	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	54
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	3	II	18	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	54
			Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade global da barragem, levando à ruptura	8	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	24	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	72
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	3	II	24	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	72

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
			Aumento da poropressão, com nível freático atingindo a face de jusante, com carreamento de material e piping (ruptura)	9	V	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	81
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	3	II	27	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	81
			Aumento da poropressão na fundação, aumentando o gradiente hidráulico no pé do aterro, causando a ruptura	8	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	24	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	72
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	3	II	24	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	72
	2.2.5.2.(2)	Carreamento de material	Erosão regressiva e piping no aterro, causando a ruptura da barragem	9	V	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	81
			Erosão regressiva e piping na fundação, causando a ruptura da barragem	9	V		3	II	27		3	81
2.2.5.3. Dreno de Pé												
Conduzir as águas	2.2.5.3.(1)	Obstrução da saída do dreno	Aumento da poropressão no aterro devido ao	6	IV	Granulometria inadequada (erro de projeto)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	54

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa		O	Crit.	Controle	D	NPR
percoladas pelo aterro e fundação até a seção de saída do sistema de drenagem		(afogamento ou colmatagem)	represamento, causando redução da tensão efetiva e instabilidade local da barragem		I	Excesso de materiais finos, causando a colmatagem do filtro	3	II	18	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	54
					I	Escolha da seção de saída do escoamento inadequada	2	II	12	Alteração do sistema de lançamento das águas percoladas no maciço	3	36
		Aumento da poropressão no aterro devido ao represamento, causando redução da tensão efetiva e instabilidade global da barragem	8	IV	Granulometria inadequada (erro de projeto)	3	II	24	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	72	
				I	Excesso de materiais finos, causando a colmatagem do filtro	3	II	24	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	72	
				I	Escolha da seção de saída do escoamento inadequada	2	II	16	Alteração do sistema de lançamento das águas percoladas no maciço	3	48	
		Aumento da poropressão, com nível freático atingindo a face de jusante, com carreamento de material e piping (ruptura)	9	V	Granulometria inadequada (erro de projeto)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	81	
				I	Excesso de materiais finos, causando a colmatagem do filtro	3	II	27	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	81	
				I	Escolha da seção de saída do escoamento inadequada	2	II	18	Alteração do sistema de lançamento das águas percoladas no maciço	3	54	
		Aumento da poropressão na fundação, aumentando o gradiente hidráulico no pé do aterro, causando a ruptura	8	IV	Granulometria inadequada (erro de projeto)	3	II	24	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	72	
				I	Excesso de materiais finos, causando a colmatagem do filtro	3	II	24	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	72	
				I	Escolha da seção de saída do escoamento inadequada	2	II	16	Alteração do sistema de lançamento das águas percoladas no maciço	3	48	

2.2.6. Reaterro

2.2.6. Reaterro

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O			Crit.	Controle	D	NPR
Permitir acesso às estruturas da eclusa e ombreira direita por jusante da barragem	2.2.6.(1)	Deformação excessiva	Abatimento da superfície	2	II	Escolha de material inadequado (erro de projeto) ou compactação ineficiente (erro de construção)	4	III	8	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	2	16	
			Perda de acesso temporário	4	III		2	II	8	Recomposição da berma de acesso	3	24	
2.2.7. Cut-off													
Aumentar o caminho de percolação pela fundação da barragem	2.2.7.(1)	Perda da função de vedação (percolação excessiva)	Fissuração e aumento da percolação, com formação de piping e ruptura	9	I	Interceptação ineficiente da camada permeável da fundação (erro de projeto)	4	III	36	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	108	
		Deformação								Falta de compactação, gerando deformações excessivas	4	III	36
2.2.8. Fundação													
Controle da percolação sob a barragem	2.2.8.(1)	Erosão interna	Piping	9	V	Percolação excessiva de água, com carreamento de material	4	III	36	Execução de poços de aívio/ monitoramento e inspeção visual	3	108	
						Aspectos geológicos não identificados (resistência insuficiente ou ocorrência geológica)				2	II	18	Aumento da investigação dos materiais geotécnicos/ inspeção e monitoramento por instrumentação
2.2.8.1. Interface Barragem-Fundação													

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
Controle da percolação e regularização da fundação do aterro de montante	2.2.8.1.(1)	Deformação excessiva	Sinkhole, com formação de piping	8	IV	Limpeza da fundação mal-sucedida deixando vazios com carreamento de material	3	II	24	Rebaixamento do lago e recomposição da subsidência	3	72
2.2.8.2. Instrumentação da Fundação (brecha basáltica arenosa)												
Monitorar a percolação na brecha basáltica, abaixo da camada de basalto denso	2.2.8.2.(1)	Falha nos piezômetros	Impossibilidade de monitoramento da estrutura	5	III	Excesso de finos no aterro ou fundação	3	II	15	Limpeza dos piezômetros	3	45
2.3. Seção "D"												
Conter o reservatório	2.3.(1)	Galgamento	Erosão do talude de jusante e abertura de brecha	9	V	Borda livre insuficiente devido a abatimento da crista	2	II	18	Alteamento da crista para atender a borda livre d projeto	2	36
					I	Vazão afluyente superior a capacidade de descarga do vertedouro	2	II	18	Monitoramento da vazões afluentes/ deplecionamento do resrvatório	3	54
					I	Falha nas comportas do vertedouro, ocasionando a sobrelevação do lago	3	II	27	Manutenção das comportas e testes frequentes	3	81
					I	Formação de onda no reservatório devido a escorregamento de taludes	3	II	27	Monitoramento de taludes no lago do reservatório que possam colapsar.	4	108
					I	Falha de projeto (erro no dimensionamento da vazão de projeto ou na capacidade do vertedouro)	2	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	54

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S	Causa	O	Crit.	Controle	D	NPR		
	2.3.(2)	Movimento de massa	Instabilidade global da estrutura, com liberação descontrolada de água	10	VI	Carregamentos excepcionais	4	III	40	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	120
					I	Falha de projeto ou construção	3	II	30	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	90
					I	Propriedades inadequadas dos materiais	3	II	30	Substituição do material/ construção de bermas estabilizadoras	3	90
					I	Aumento da subpressão e consequente redução da tensão efetiva	4	III	40	Monitoramento com piezômetros/ execução de estruturas de alívio ou bermas estabilizadoras	3	120
					I	Abalos sísmicos	2	II	20	Monitoramento por acelerômetros/ redução do impacto pelo deplecionamento do lago ou construção de bermas estabilizadoras	3	60
					I	Terrorismo/ sabotagem	2	II	20	Restrição de acesso à area da barragem	2	40
	2.3.(3)	Erosão interna	Formação de piping com ruptura da barragem	9	V	Falha de projeto ou construção	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	81
					I	Abertura de fissuras e trincas internas	4	III	36	Monitoramento com instrumentação e inspeção visual de surgências, construção de sistemas de filtro	3	108
					I	Percolação ou poropressão elevada atingindo a face de jusante	4	III	36	Inspeção visual/ monitoramento e construção de poços de alívio ou bermas estabilizadoras	3	108
					I	Abertura de caminho preferencial por raízes e tocas de animais	3	II	27	Limpeza regular da região da barragem	2	54

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
					I	Granulometria inadequada do material	3	II	27	Monitoramento com instrumentação e inspeção visual de surgências, construção de sistemas de filtro	3	81
2.3.1. Crista												
Manter a borda livre	2.3.1.(1)	Deformação excessiva	Abatimento da crista sem perda da borda livre de projeto	2	II	Recalques (inadequação de projeto ou construção)	4	III	8	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	24
			Abatimento da crista com perda da borda livre, com galgamento e erosão externa, ocorrendo a ruptura	9	V			I	36	Selagem de trincas e recompactação		108
	2.3.1.(2)	Abertura de fissuras transversais	Abertura de fissuras transversais, permitindo a passagem de água do reservatório e evoluindo para uma brecha	9	V	Recalques diferenciais (mudança brusca de seção ou de módulo de elasticidade de materiais)	3	II	27	Abrandamento dos taludes íngremes/ monitoramento e inspeções visuais	2	54
Permitir o acesso às estruturas	2.3.1.(3)	Obstrução do acesso	Perda do acesso às estruturas	2	II	Deformações excessivas	4	III	8	Alteamento da crista	2	16
2.3.2. Espalдар Jusante												
Manter a estabilidade mecânica	2.3.2.(1)	Instabilidades associadas a movimento de massa	Instabilidade local (abatimentos ou depressões), podendo ser progressiva se não tratada	5	III	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	15	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	45
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	15	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	45

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
			Instabilidade global	10	VI	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	30	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	90
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	30	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	90
Proteger o talude de jusante contra erosão	2.3.2.(2)	Perda da proteção vegetal	Erosão superficial devido à ocorrência de precipitação	1	I	Retirada da proteção vegetal	6	III	6	Recomposição da proteção vegetal	1	6
2.3.3. Espaldar Montante												
Manter a estabilidade mecânica	2.3.3.(1)	Instabilidades associadas a movimento de massa	Instabilidade local (abatimentos ou depressões), podendo ser progressiva se não tratada	5	III	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	15	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	45
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	15	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	45
			Instabilidade global	10	VI	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	30	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	90
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	30	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	90
2.3.3.1. Rip-Rap												
Proteção do espaldar de montante contra ondas e flutuação no nível operativo do reservatório	2.3.3.1.(1)	Perda da proteção de enrocamento	Erosão com instabilidade local	5	I	Degradação do material do rip-rap	6	III	30	Recomposição do rip-rap e	2	60
						Deslocamento pela ação das ondas	4	III	20		2	40
						Movimentação por colapso	3	II	15		2	30
						Movimentação por fluência	3	II	15		2	30

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
						Erros de projeto/ construção	3	II	15	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	2	30
2.3.4. Aterro Compactado												
Manter a estabilidade mecânica	2.3.4.(1)	Instabilidade devido a movimento de massa	Instabilidade local da barragem	6	IV	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	54
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	18	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	54
					I	Carregamento excepcional (rebaixamento rápido)	4	III	24	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	72
		Instabilidade global da barragem	10	VI	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	30	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	90	
				I	Erro de construção (compactação)	3	II	30	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	90	
				I	Percolação ou poropressão elevada	4	III	40	Inspeção visual/ monitoramento e construção de poços de alívio ou bermas estabilizadoras	3	120	
				I	Carregamento excepcional (rebaixamento rápido)	4	III	40	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ construção de bermas estabilizadoras	3	120	
		2.3.4.(2)	Deformação excessiva	Fissuração com instabilidade local	4	III	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	12	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	12	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	36
			Fissuração com instabilidade global e ruptura	9	V	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	81
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	27	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	81
					I	Percolação ou poropressão elevada	4	III	36	Inspeção visual/ monitoramento e construção de poços de alívio ou bermas estabilizadoras	3	108
			Galgamento	9	V	Recalque excessivo (erro de projeto ou de construção)	4	III	36	Alteamento da estrutura do aterro	3	108
Aumentar o caminho de percolação, reduzindo o gradiente hidráulico	2.3.4.(3)	Percolação excessiva	Erosão regressiva com piping	9	V	Aumento da poropressão devido a falha no filtro	4	III	36	Prever projeto de poços de alívio ou sistema de drenagem para alívio da subpressão/ inspeção e monitoramento	3	108
					I	Fissuração interna devido a recalques excessivos ou recalques diferenciais entre seções	4	III	36	Monitoramento por instrumentação/ injeção ou construção de sistemas de filtro e drenagem	4	144
2.3.4.1. Interface Aterro-Filtro												
Controle da percolação sem carreamento de material da barragem	2.3.4.1.(1)	Perda da função de filtro do material do aterro (carreamento de material)	Carreamento de material com formação de piping e ruptura	9	V	Granulometria do material do filtro inadequada (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	81
			Carreamento de material com formação de sinkholes	8	IV			I	24	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular		72

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
	2.3.4.1.(2)	Colmatação da interface do filtro	Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade local da barragem	6	IV	Granulometria do material do filtro inadequada (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	54
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatação do filtro	4	III	24	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	72
			Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade global da barragem, levando à ruptura	10	VI	Granulometria do material do filtro inadequada (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	30	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	90
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatação do filtro	4	III	40	Aumento da investigação dos materiais geotécnicos/ inspeção e monitoramento por instrumentação	3	120
2.3.5. Sistema de Drenagem Interna												
Conduzir as águas percoladas no aterro ao dreno de pé sem elevação da pressão neutra	2.3.5.(1)	Perda da permeabilidade	Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade local da barragem	6	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	54
			Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade global da barragem, levando à ruptura	8	IV				24	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	72

Função	Modo de Falha	Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
		Aumento da poropressão, com nível freático atingindo a face de jusante, com carreamento de material e piping	9	V				27		3	81
2.3.5.1. Filtro Vertical											
Conduzir as águas percoladas no corpo do aterro ao filtro horizontal	2.3.5.1.(1)	Perda da permeabilidade	6	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	54
				I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	24	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	72
			8	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	24	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	72
				I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	32	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	96
			9	V	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	81

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	4	III	36	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	108
2.3.5.2. Filtro Horizontal												
Conduzir as águas percoladas pelo aterro e pela fundação ao dreno de pé.	2.3.5.2.(1)	Perda da permeabilidade	Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade local da barragem	6	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	54
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	3	II	18	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	54
			Aumento da poropressão causando redução da tensão efetiva e instabilidade global da barragem, levando à ruptura	8	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	24	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	72
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	3	II	24	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	72
			Aumento da poropressão, com nível freático atingindo a face de jusante, com carreamento de material e piping (ruptura)	9	V	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompactação, se necessário	3	81

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O			Crit.	Controle	D	NPR
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatação do filtro	3	II	27		Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	81
			Aumento da poropressão na fundação, aumentando o gradiente hidráulico no pé do aterro, causando a ruptura	8	IV	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	24		Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompressão, se necessário	3	72
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatação do filtro	3	II	24		Recuperação do sistema de drenagem colmatado	3	72
	2.3.5.2.(2)	Carreamento de material	Erosão regressiva e piping no aterro, causando a ruptura da barragem	9	V	Granulometria do material do filtro inadequada ou no arranjo do filtro (erro de projeto) ou problemas na compactação (erro de construção)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e recompressão, se necessário	3	81	
			Erosão regressiva e piping na fundação, causando a ruptura da barragem	9	V		3	II	27		3	81	
	2.3.5.3. Dreno de Pé												
Conduzir as águas percoladas pelo aterro e fundação até a seção de saída do sistema de drenagem	2.3.5.3.(1)	Obstrução da saída do dreno (afogamento ou colmatação)	Aumento da poropressão no aterro devido ao represamento, causando redução da tensão efetiva e instabilidade local da barragem	6	IV	Granulometria inadequada (erro de projeto)	3	II	18		Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	2	36
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatação do filtro	3	II	18		Recuperação do sistema de drenagem colmatado	2	36
					I	Escolha da seção de saída do escoamento inadequada	2	II	12		Alteração do sistema de lançamento das águas percoladas no maciço	2	24
			Aumento da poropressão no aterro devido ao	8	IV	Granulometria inadequada (erro de projeto)	3	II	24		Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	2	48

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S	Causa	O	Crit.	Controle	D	NPR		
			represamento, causando redução da tensão efetiva e instabilidade global da barragem		I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	3	II	24	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	2	48
					I	Escolha da seção de saída do escoamento inadequada	2	II	16	Alteração do sistema de lançamento das águas percoladas no maciço	2	32
			Aumento da poropressão, com nível freático atingindo a face de jusante, com carreamento de material e piping (ruptura)	9	V	Granulometria inadequada (erro de projeto)	3	II	27	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	2	54
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	3	II	27	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	2	54
					I	Escolha da seção de saída do escoamento inadequada	2	II	18	Alteração do sistema de lançamento das águas percoladas no maciço	2	36
			Aumento da poropressão na fundação, aumentando o gradiente hidráulico no pé do aterro, causando a ruptura	8	IV	Granulometria inadequada (erro de projeto)	3	II	24	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	2	48
					I	Excesso de materiais finos, causando a colmatção do filtro	3	II	24	Recuperação do sistema de drenagem colmatado	2	48
					I	Escolha da seção de saída do escoamento inadequada	2	II	16	Alteração do sistema de lançamento das águas percoladas no maciço	2	32
			2.3.5.6. Enrocamento de pé									
Estabilidade e proteção da região sob influência do nível de jusante	2.3.5.6.(1)	Instabilidade devido a movimento de massa	Instabilidade local da barragem	5	III	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	4	III	20	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	2	40
					I	Erro de construção (compactação)	2	II	10	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	4	40
	2.3.5.6.(2)	Deformação excessiva	Fissuração com instabilidade local	5	III	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	4	III	20	Aumento da investigação geotécnica dos materiais	2	40
					I	Erro de construção (compactação)	2	II	10		4	40

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S	Causa	O	Crit.	Controle		D	NPR	
2.3.6. Fundação												
Controle da percolação sob a barragem	2.3.6.(1)	Erosão interna	Piping	9	V	Percolação excessiva de água, com carreamento de material	3	II	27	Execução de poços de aívio/ monitoramento e inspeção visual	3	81
						Aspectos geológicos não identificados (resistência insuficiente ou ocorrência geológica)	2	II	18	Aumento da investigação dos materiais geotécnicos/ inspeção e monitoramento por instrumentação	6	108
2.3.6.1. Interface Barragem-Fundação												
Controle da percolação e regularização da fundação do aterro de montante	2.3.6.1.(1)	Deformação excessiva	Sinkhole, com formação de piping	8	IV	Limpeza da fundação mal-sucedida deixando vazios com carreamento de material	3	II	24	Rebaixamento do lago e recomposição da subsidência	3	72
2.3.6.2. Instrumentação da Fundação (brecha basáltica arenosa)												
Monitorar a percolação na brecha basáltica, abaixo da camada de basalto denso	2.3.6.2.(1)	Falha nos piezômetros	Impossibilidade de monitoramento da estrutura	5	III	Excesso de finos no aterro ou fundação	3	II	15	Limpeza dos piezômetros	3	45
3. Casa de Força												
Abrigas as unidades geradoras e evitar vibração	3.(1)	Excesso de vibração	Fadiga dos equipamentos eletromecânicos, podendo levar a falha e paralisação das atividades de geração.	7	IV	Falta de peso para estabilizar a estrutura (erro de projeto)	2	II	14	Realização de reforços na estrutura	3	42
					I	Entrada de ar no circuito de geração	2	II	14	Manutenção de submersgência mínima na tomada d'água	3	42
					I	Erro na instalação das turbinas (excentricidade)	3	II	21	Ajuste fino da turbina	4	84

Função	Modo de Falha	Efeito Final	S	Causa	O	Crit.	Controle	D	NPR
		Desgaste das estruturas civis, com ocorrência de trincas de movimentação	3	II	Falta de peso para estabilizar a estrutura (erro de projeto)	2 II 6	Realização de reforços na estrutura	3	18
				I	Entrada de ar no circuito de geração	2 II 6	Manutenção de submersão mínima na tomada d'água	3	18
				I	Erro na instalação das turbinas (excentricidade)	3 II 9	Ajuste fino da turbina	4	36
		Enfraquecimento do contato concreto-fundação, podendo aumentar a subpressão e levar a ruptura	9	V	Falta de peso para estabilizar a estrutura (erro de projeto)	2 II 18	Realização de reforços na estrutura	3	54
				I	Entrada de ar no circuito de geração	2 II 18	Manutenção de submersão mínima na tomada d'água	3	54
				I	Erro na instalação das turbinas (excentricidade)	3 II 27	Ajuste fino da turbina	4	108
Conter o reservatório e garantir a estabilidade	3.(2)	Instabilidade global (deslizamento, tombamento ou flutuação)	10	VI	Carregamentos excepcionais (subpressão, sismo, assoreamento, etc)	4 III 40	Verificação de estabilidade global para os casos de carregamento excepcionais/ rebaixamento do reservatório	3	120
				I	Erro de projeto	3 II 30	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	90
	3.(3)	Reações deletérias no concreto armado (RAA, etringita tardia,	7	IV	Percolação excessiva devido a porosidade do concreto (erro de traço ou construtivo)	4 III 28	utilização de mantas ou recomposição da superfície do concreto/ inspeção visual	3	84
				I	Utilização de agregados reativos	3 II 21	Utilização de cimento com pozolanas	3	63

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S	Causa			O	Crit.	Controle	D	NPR
		carbonatação, corrosão da armadura)			I	Elevado calor de hidratação do concreto	5	III	35	Utilização de técnicas para redução do calor de hidratação (redução do consumo de cimento, utilização de gelo no concreto, etc)	2	70
					I	Ataque por meio agressivo (corrosão da armadura)	4	III	28	Manutenção de camada de proteção da armadura	3	84
			Fissuração e percolação pelas paredes	4	III	Lixiviação do concreto (aumento da porosidade)	6	III	24	Inspeção visual/ impermeabilização da face da estrutura	1	24
	3.(4)	Recalque diferencial entre blocos	Ruptura dos veda-juntas (aumento da percolação) e desalinhamento das máquinas	4	III	Problemas na fundação (movimentação de camadas geológicas)	4	III	16	Monitoramento com instrumentação	4	64
					I	Reações expansivas no concreto	4	III	16	Controle dos materiais utilizados no concreto e dos elementos presentes nos meios agressivos	3	48
					I	Carregamentos excepcionais (subpressão, sismo, assoreamento, etc)	5	III	20	Verificação de estabilidade global para os casos de carregamento excepcionais/ rebaixamento do reservatório	4	80
					I	Dilatação térmica dos blocos	6	III	24	Monitoramento com medidores triortogonais e medidores de vazão	3	72
	3.1. Tomada D'água											
Permitir a adução de vazão para o circuito de geração, promovendo uma	3.1.(1)	Aproximação inadequada do escoamento	Aumento da perda de carga no circuito de geração	4	III	Design da tomada d'água ineficiente (erro de projeto)	3	II	18	Adequação do design da tomada d'água pautada em modelos reduzidos e critérios técnicos	2	36
			Desenvolvimento de zonas de pressão negativa, podendo ocorrer cavitação	5	III							

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O			Crit.	Controle	D	NPR
aceleração gradual do fluxo para dentro dos condutos													
3.1.1. Grade da Tomada D'água													
Conter os sólidos carregados juntamente com o escoamento	3.1.1.(1)	Perder a função de retenção de material	Entrada de material no circuito de geração, prejudicando a operação das turbinas e necessitando de reparos onerosos	3	I	Danos à grade devido ao impacto de material de grande porte	2	II	6	Dimensionamento das grades para suportar impactos de cargas sólidas	2	12	
						Erro no dimensionamento da grade (erro de projeto)	3	II	9			18	
3.1.2. Comporta Stop-log													
Ensecamento do circuito de geração para manutenção	3.1.2.(1)	Perda da função de vedação	Vazamentos pela comporta, dificultando as atividades de manutenção das comportas segmento	2	II	Falta de manutenção nas comportas e guias	4	III	8	Realizar testes e manutenções regulares	2	16	
3.1.3. Comporta Emergência													
Cortar o fluxo do circuito de geração para proteção das máquinas	3.1.3.(1)	Falha no acionamento	Danos às máquinas	5	III	Falha no sistema de acionamento	3	II	15	Realizar testes e manutenções regulares	3	45	
3.2. Conduto Forçado													
Conduzir o escoamento da tomada d'água às turbinas	3.2.(1)	Cavitação	Necessidade de reparos onerosos e paralisação da unidade de geração	5	III	Velocidade elevada (erro de projeto)	3	II	15	Dimensionamento adequado das estruturas do circuito de geração, com base em critérios técnicos	3	45	
					I	Ocorrência de pressão negativa devido a imperfeições nas paredes da estrutura ou singularidades	3	II	15	Regularização da superfície do concreto	4	60	

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
	3.2.(2)	Movimentação excessiva	Deslocamento do conduto com aparecimento de trincas na estrutura	3	II	Vibração devido a entrada de ar no circuito	2	II	6	Manutenção de submersão mínima na tomada d'água	2	12
					I	Vibração devido a falta de ancoragem dos condutos	3	II	9	Realização de reforços na estrutura	2	18
	3.2.(3)	Colapso	Ruína da estrutura, com paralisação da geração e podendo levar a ruptura	7	IV	Carregamento excepcional (esvaziamento rápido ou rejeição de carga)	2	II	14	Previsão de estruturas de proteção e dimensionamento dos condutos para suportar os esforços	2	28
3.3. Turbina*												
Utilizar a energia potencial para rotação das pás das turbinas	3.3.(1)	Cavitação das pás da turbina	Necessidade de troca do conjunto	5	III	Presença de sedimentos suspensos no escoamento aduzido	3	II	15	Execução de um desarenador para sedimentação do material em suspensão/ manutenção de velocidades baixas no canal de adução	3	45
	3.3.(2)	Movimentação do eixo da turbina	Perda de eficiência, podendo levar ao colapso da estrutura	7	IV	Corrosão dos pontos de ajuste fino das turbinas	3	II	21	Proteção galvânica das peças, manutenção e inspeção periódica	4	84
					I	Falha na instalação das turbinas	3	II	21	Ajuste fino da turbina	3	63
					I	Vibração excessiva da turbina	2	II	14	Ajuste fino da turbina/ previsão de reforços na estrutura civil para absorver a vibração do conjunto	3	42
					I	Falta de manutenção	4	III	28	Realização de manutenções periódicas	3	84
3.4. Gerador*												
Conversão da energia mecânica em	3.4.(1)	Falha no sistema elétrico	Paralisação da geração e risco de incendio	5	III	Falha de projeto	3	II	15	Dimensionamento adequado dos componentes do gerador e sistema de proteção contra incêndio	2	30
					I	Falta de manutenção	4	III	20	Realização de manutenções periódicas	3	60

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
energia elétrica					I	Erro de operação (erro humano)	4	III	20	Treinamento do pessoal responsável pela operação dos equipamentos	4	80
3.5. Poço de Esgotamento (bombas)												
Expulsar as águas percoladas na casa de força	3.5.(1)	Parada das bombas	Inundação de parte da casa de força	5	III	Falta de manutenção	4	III	20	Realização de manutenções periódicas	3	60
					I	Falha de projeto	3	II	15	Dimensionamento adequado das bombas e dos sistemas de alimentação	2	30
					I	Falha na operação das bombas (erro no sistema de lógica ou erro humano)	4	III	20	Treinamento do pessoal responsável pela operação dos equipamentos e testes periódicos para identificação de anomalias	3	60
3.6. Área de Montagem												
Prover apoio para operação de equipamentos pesados	3.6.(1)	Perda da capacidade de suporte	Instabilidade local e paralisação temporária das atividades de montagem	4	III	Erro de projeto	2	II	8	Realização de reforços	3	24
					I	Carregamentos excepcionais	4	III	16	Dimensionamento de suporte da área de montagem para cargas excepcionais, durante a etapa de projeto	4	64
3.7. Galeria de Drenagem e Injeção												
Permitir a saída da vazão dos drenos de fundação e acesso ao local de perfuração de cortina de injeção	3.7.(1)	Incapacidade de expulsar as águas percoladas	Aumento da subpressão sob a estrutura, com possibilidade de instabilidade global	8	IV	Falha nas bombas	3	II	24	Dimensionamento adequado das bombas e dos sistemas de alimentação	4	96
					I	Sistema de canaletas de drenagem inadequado	3	II	24	Realização de redimensionamento das canaletas, aumentando a capacidade	2	48
			Perda do acesso à galeria	4	III	Inundação da galeria, inviabilizando o acesso	2	II	8	Esgotamento através de bombas e realização dos reparos necessários	2	16
3.8. Canal de Fuga												

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
Prover a restituição das águas turbinadas ao curso natural do rio	3.8.(1)	Erosão	Deslizamentos localizados	3	II	Velocidade e conformação inadequada do fluxo de restituição (erro de projeto)	3	II	9	Previsão da velocidade no canal e proteção adequada dos taludes	3	27
					I	Falta de proteção dos taludes (erro de projeto ou de construção)	3	II	9		2	18
					I	Erosão devido a outros fatores externos	4	III	12	Proteção dos taludes com enocamentos ou outros revestimentos adequados	2	24
	3.8.(2)	Perda de carga excessiva	Perda de receita de geração	4	III	Erro de projeto	3	II	12	Ensecamento da região do canal para escavação da seção de controle	3	36
3.9. Fundação												
Prover suporte para as estruturas da casa de força	3.9.(1)	Movimento de massa	Colapso da estrutrua (ruptura)	10	VI	Plano de fragilidade na fundação,não identificado no reconhecimento geológico	2	II	20	Aumentar as investigações geológicas durante a etapa de projeto	6	120
Reduzir a percolação pela fundação	3.9.(2)	Aumento da percolação	Piping	9	V	Carreamento de material de brecha subhorizontal	3	II	27	Monitoramento com piezômetros e perfuração de furos de drenagem/ inspeção visual a jusante	3	81
					I	Falha da cortina de injeção	4	III	36	Recomposição da cortina de injeção (perfuração a partir da galeria)	3	108
					I	Colmatação dos drenos	4	III	36	Limpeza dos drenos	2	72
			Aumento da subpressão	6	IV	Falha da cortina de injeção	4	III	24	Recomposição da cortina de injeção (perfuração a partir da galeria)	3	72
					I	Colmatação dos drenos	4	III	24	Limpeza dos drenos	2	48

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
					I	Abertura do contato concreto-rocha a montante	3	II	18	Monitoramento com extensômetros múltiplos de haste/ verificação da estabilidade global para o caso de drenos inoperantes	3	54
3.9.1. Instrumentação da Fundação												
Monitorar a percolação na brecha basáltica abaixo da estrutura	3.9.1.(1)	Falha nos piezômetros	Impossibilidade de monitoramento da estrutura	5	III	Excesso de finos no aterro ou fundação	3	II	15	Limpeza dos piezômetros	3	45
Monitorar a movimentação dos horizontes da fundação	3.9.1.(2)	Falha nos extensômetros	Impossibilidade de monitoramento dos deslocamentos da fundação	5	III	Plano de fragilidade na fundação	4	III	20	Reinstrumentação e verificação de estabilidade	3	60
4. Vertedouro												
Descarregar as cheias excepcionais garantindo a integridade das estruturas	4.(1)	Instabilidade global (deslizamento, tombamento ou flutuação)	Ruptura da estrutura civil do vertedouro	10	VI	Carregamentos excepcionais (subpressão, sismo, assoreamento, etc)	4	III	40	Verificação de estabilidade global para os casos de carregamento excepcionais/ rebaixamento do reservatório	3	120
					I	Erro de projeto	2	II	20	Realização de reforços na estrutura	3	60
	4.(2)	Incapacidade de descarregar uma cheia excepcional	Sobrelevação do reservatório, com galgamento e ruptura	9	V	Erro de projeto	2	II	18	Rebaixamento do reservatório para garantir volume de espera/ construção de vertedouro auxiliar	3	54
	4.(3)	Reações deletérias no concreto (RAA, etringita tardia, carbonatação)	Expansão do concreto, fissuração e problemas para movimentação das comportas	7	IV	Percolação excessiva devido a porosidade do concreto (erro de traço ou construtivo)	4	III	28	Recomposição da superfície do concreto ou utilização de mantas/ inspeção visual	3	84
					I	Utilização de agregados reativos	3	II	21	Utilização de cimento com pozolanas	3	63

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
					I	Elevado calor de hidratação do concreto	5	III	35	Utilização de técnicas para redução do calor de hidratação (redução do consumo de cimento, utilização de gelo no concreto, etc)	2	70
					I	Ataque por meio agressivo (corrosão da armadura)	4	III	28	Manutenção de camada de proteção da armadura	3	84
			Fissuração e aumento da percolação	4	III	Lixiviação do concreto (aumento da porosidade)	4	III	16	Garantir a estanqueidade com injeções ou utilização de tratamentos e mantas.	3	48
	4.(4)	Recalque diferencial entre blocos	Ruptura dos veda-juntas (aumento da percolação) e desalinhamento das máquinas	5	III	Problemas na fundação (movimentação de camadas geológicas)	3	II	15	Monitoramento com extensômetros múltiplos de haste/ verificação da estabilidade global e rebaixamento do reservatório em caso de risco elevado	4	60
					I	Reações expansivas no concreto	3	II	15	Criação de juntas de alívio para expansão controlada do concreto/ impermeabilização da superfície para reduzir as reações expansivas/ análise da estabilidade e das tensões máximas no concreto	4	60
					I	Carregamentos excepcionais (subpressão, sismo, assoreamento, etc)	4	III	20	Verificação de estabilidade global para os casos de carregamento excepcionais/ rebaixamento do reservatório	4	80
					I	Dilatação térmica dos blocos	5	III	25	Monitoramento com medidores triortogonais e medidores de vazão	2	50
4.1. Comporta Segmento												
Permitir a operação do	4.1.(1)	Perda da operação das	Sobrelevação do reservatório, com	7	I	Falha no fornecimento elétrico	4	III	28	Previsão de sistemas de alimentação redundantes	3	84

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O			Crit.	Controle	D	NPR
reservatório		comportas	galgamento e ruptura			Empenamento da comporta devido a movimentação da estrutura (reações deletérias do concreto ou corrosão)	3	II	21	criação de zonas de alívio para expansão controlada do concreto	4	84	
						Erro de operação (erro humano)	5	III	35	Treinamento do pessoal responsável pela operação dos equipamentos e testes periódicos	3	105	
						Falha estrutural nos elementos da comporta (erro de projeto)	4	III	28	Utilização de critérios técnicos de projeto dos elementos estruturais	4	112	
						Falta de manutenção	5	III	35	Realização de manutenções e testes periódicos	3	105	
						Sabotagem/ vandalismo	1	I	7	Restrição de acesso à area da barragem	2	14	
4.2. Comporta Stop-Log													
Prover a vedação para manutenção das comportas segmento	4.2.(1)	Perda da função de vedação	Vazamentos pela comporta, dificultando as atividades de manutenção das comportas segmento	4	III	Falta de manutenção nas comportas e guias	5	III	20	Realização de manutenções e testes periódicos	2	40	
4.3. Ogiva (Perfil Creager)													
Permitir a passagem do escoamento em velocidade sem danos à estrutura	4.3.(1)	Cavitação na face de jusante	Danos à estrutura de concreto, necessitando de reparos de alta complexidade e onerosos	6	IV	Erro no dimensionamento do perfil vertente (erro de projeto)	2	II	12	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico e modelos reduzidos	2	24	
					I	Falhas na regularização do concreto de superfície	3	II	18	Regularização da superfície do concreto	3	54	
					I	Passagem de vazão superior à vazão de projeto	2	II	12	Realização de inspeções especiais para verificar as condições da superfície da estrutura	3	36	

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
					I	Falha na recomposição do perfil vertente nos vãos plugados das adufas de desvio	3	II	18	Realização de reforço e recomposição do perfil	3	54
Garantir a eficiência hidráulica	4.3.(2)	Redução da capacidade de descarga da estrutura	Sobrelevação do reservatório, podendo levar ao alargamento e piping	8	IV	Perfil executado diferente daquele previsto em projeto, tendo eficiência hidráulica reduzida	1	I	8	Avaliação do impacto sobre as vazões descarregadas e recomposição do perfil vertente conforme projeto, caso necessário	2	16
4.4. Viga Munhão												
Transferir os esforços dos braços da comporta para a estrutura civil	4.4.(1)	Perda da função estrutural	Colapso da comporta com liberação descontrolada de água	8	IV	Corrosão da armadura de protensão	3	II	24	Realização de manutenções e inspeções regulares	2	48
						Reações deletérias no concreto	4	III	32	Utilização de cimento com pozolanas/ impermeabilização da superfície das estrutruas afetadas para reduzir as reações	3	96
						Cargas excepcionais ou excêntricas	4	III	32	Melhoria nos critérios de projeto/ reforço na estrutura da viga munhão	3	96
4.5. Muros Laterais (vãos)												
Confinar o escoamento proveniente dos vãos do vertedouro e prover o suporte da estrutura	4.5.(1)	Movimentação ou perda da função estrutural	Colapso da comporta com liberação descontrolada de água	8	IV	Erro de projeto ou construção	2	II	16	Monitoramento e inspeção regular das estruturas/ reforço estrutural quando necessário	2	32
			Empenamento da comporta, podendo causar sobrelevação do lago e galgamento com ruptura	9	V	Reações deletérias do concreto	4	III	36	Utilização de cimento com pozolanas/ impermeabilização da superfície das estrutruas afetadas para reduzir as reações	3	108

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
	4.5.(2)	Perda da função de vedação	Perda de água do reservatório	2	II	Falta de manutenção	4	III	8	Realizar testes e manutenções regulares	2	16
	4.5.(3)	Perturbações no escoamento	Cavitação no concreto da ogiva e muros	3	II	Erro de projeto	2	II	6	Inspeção visual e regularização da superfície nas regiões afetadas	2	12
4.6. Bacia de Dissipação												
Dissipar parte da energia proveniente do escoamento para restituição ao leito natural do rio	4.6.(1)	Não prover a devida perda de energia	Flutuação do escoamento a jusante ocasionando correntes de retorno e erosão nas margens	5	III	Erro no dimensionamento da bacia de dissipação ou extrapolação da curva-chave (erro de projeto)	3	II	15	Ensecamento da bacia de dissipação para e realização de obras de adequação	3	45
	4.6.(2)	Erosão da laje	Degradação do concreto, neccessitando reparos	5	III	Sedimentos grossos na bacia de dissipação, que associados a correntes de retorno causam erosão no concreto	4	III	20	Realizar a escavação e limpeza da da fundação na região da bacia, evitando que blocos soltos sejam trazidos para dentro da estrutura devido a correntes de retorno.	3	60
			Erosão atingindo a fundação, podendo ocasionar erosão regressiva e ruptura da barragem	7	IV				28			84
4.6.1. Muros laterais (bacia de dissipação)												
Confinar o escoamento proveniente do vertedouro e garantir borda livre adequada	4.6.1.(1)	Não garantir a borda livre	Galgamento lateral dos muros, causando erosão no pé da barragem de transição	4	III	Erro de projeto	2	II	8	Alteamento e reforço estrutural	4	32
			Galgamento lateral dos muros, causando perturbação no canal de fuga	3	II				6			24

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
	4.6.1.(2)	Erosão das paredes do muro lateral	Degradação do concreto, necessitando reparos	3	II	Presença de sedimentos grossos e correntes de retorno	4	III	12	Realizar a escavação e limpeza da da fundação na região da bacia, evitando que blocos soltos sejam trazidos para dentro da estrutura devido a correntes de retorno.	4	48
	4.6.1.(3)	Perda da função estrutural	Colapso da estrutura	7	IV	Erro de projeto	2	II	14	Realização de reforço estrutural na estrutura	4	56
4.7. Aproximação												
Conformar o escoamento para entrada nos vãos do vertedouro	4.7.(1)	Causar o estrangulamento do escoamento na entrada da estrutura	Redução da capacidade do vertedouro, com sobrelevação do lago e possível ruptura	3	II	Erro de projeto	2	II	6	Verificação das condições de escoamento em modelos reduzidos/ verificação do impacto na capacidade de descarga do vertedouro	3	18
4.8. Galeria de drenagem e injeção												
Permitir a saída da vazão dos drenos de fundação e acesso ao local de perfuração de cortina de injeção	4.8.(1)	Incapacidade de expulsar as águas percoladas	Aumento da subpressão sob a estrutura, com possibilidade de instabilidade global	6	IV	Falha nas bombas	4	III	24	Dimensionamento adequado das bombas e dos sistemas de alimentação, com teste periódicos	3	72
					I	Sistema de canaletas de drenagem inadequado	5	III	30	Realização de redimensionamento das canaletas, aumentando a capacidade	2	60
			Perda do acesso à galeria	3	II	Inundação da galeria, inviabilizando o acesso	2	II	6	Esgotamento através de bombas e realização dos reparos necessários	2	12

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S	Causa		O	Crit.	Controle		D	NPR
4.9. Galeria de desvio tamponada												
Vedar a passagem de água pela estrutura utilizada durante o desvio do rio	4.9.(1)	Colapso do plugue	Abertura da estrutura de desvio com liberação descontrolada de água	4	III	Má execução do plugue (erro de construção)	2	II	8	Realização de reforço estrutural na estrutura	3	24
					I	Erro de projeto	2	II	8		2	16
	4.9.(2)	Percolação excessiva	Degrada ção do concreto com possibilidade de cavitação	2	II	Má execução ou degradação do concreto	2	II	4		3	12
4.10. Fundação												
Prover suporte para as estruturas do vertedouro	4.10.(1)	Movimento de massa	Colapso da estrutrua (ruptura)	10	VI	Plano de fragilidade na fundação,não identificado no reconhecimento geológico	2	II	20	Aumentar as investigações geológicas durante a etapa de projeto/ monitoramento da fundação	6	120
Reduzir a percolação pela fundação	4.10.(2)	Aumento da percolação	Piping	9	V	Carreamento de material de brecha subhorizontal	3	II	27	Monitoramento do aumento da percolação por meio de piezômetros	4	108
					I	Falha da cortina de injeção	4	III	36	Recomposição da cortina de injeção (perfuração a partir da galeria)	3	108
					I	Colmatação dos drenos	4	III	36	Limpeza dos drenos	2	72
			Aumento da subpressão	6	IV	Falha da cortina de injeção	4	III	24	Recomposição da cortina de injeção (perfuração a partir da galeria)	3	72
					I	Colmatação dos drenos	4	III	24	Limpeza dos drenos	2	48
					I	Abertura do contato concreto-rocha a montante	4	III	24	Monitoramento com extensômetros múltiplos de haste/ verificação da estabilidade global para o caso de drenos inoperantes	3	72
4.10.1. Instrumentação da Fundação												

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
Monitorar a percolação na brecha basáltica abaixo da estrutura	4.10.1.(1)	Falha nos piezômetros	Impossibilidade de monitoramento da estrutura	5	III	Excesso de finos no aterro ou fundação	3	II	15	Limpeza dos piezômetros	3	45
5. Muro de Transição - Margem Esquerda/ Margem Direita												
Garantir estabilidade e conter o reservatório	5.(1)	Instabilidade global (deslizamento, tombamento ou flutuação)	Ruptura da estrutura civil, com liberação descontrolada de água	10	VI	Carregamentos excepcionais (subpressão, sismo, assoreamento, etc)	4	III	40	Verificação de estabilidade global para os casos de carregamento excepcionais/ rebaixamento do reservatório	3	120
					I	Erro de projeto	2	II	20	Realização de reforços na estrutura	2	40
	5.(2)	Reações deletérias no concreto armado (RAA, etringita tardia, carbonatação, corrosão da armadura)	Aparecimento de fissuras e aumento da percolação	7	IV	Percolação excessiva devido a porosidade do concreto (erro de traço ou construtivo)	5	III	35	Recomposição da superfície do concreto ou utilização de mantas/ inspeção visual	2	70
					I	Utilização de agregados reativos	3	II	21	Utilização de cimento com pozolanas	3	63
					I	Elevado calor de hidratação do concreto	4	III	28	Utilização de técnicas para redução do calor de hidratação (redução do consumo de cimento, utilização de gelo no concreto, etc)	3	84
					I	Lixiviação do concreto (aumento da porosidade)	4	III	28	Inspeção visual/ impermeabilização da face da estrutura	1	28
	5.(3)	Recalque diferencial entre blocos	Ruptura dos veda-juntas (aumento da percolação) e possibilidade de piping	4	III	Problemas na fundação (movimentação de camadas geológicas)	3	II	12	Monitoramento com extensômetros múltiplos de haste/ verificação da estabilidade global e rebaixamento do reservatório em caso de risco elevado	4	48
					I	Reações expansivas no concreto	3	II	12	Criação de juntas de alívio para expansão controlada do concreto/ impermeabilização da superfície para reduzir as reações expansivas/ análise da estabilidade e das tensões máximas no concreto	4	48

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S	Causa		O	Crit.	Controle	D	NPR	
					I	Carregamentos excepcionais (subpressão, sismo, assoreamento, etc)	4	III	16	Verificação de estabilidade global para os casos de carregamento excepcionais/ rebaixamento do reservatório	3	48
					I	Dilatação térmica dos blocos	5	III	20	Monitoramento com medidores triortogonais e medidores de vazão	2	40
5.1. Enrocamento												
Reduzir a seção do aterro garantindo estabilidade para "abraço" dos muros de transição	5.1.(1)	Instabilidade devido a movimento de massa	Instabilidade local da barragem	6	IV	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	2	II	12	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	36
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	18	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	4	72
					I	Carregamento excepcional	4	III	24	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ reforço na estrutura de enrocamento	3	72
		Instabilidade global da barragem	9	V	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	2	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	54	
				I	Erro de construção (compactação)	3	II	27	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	4	108	
				I	Carregamento excepcional	4	III	36	Verificação de estabilidade para diversos casos de carregamentos/ reforço na estrutura de enrocamento	3	108	
	5.1.(2)	Deformação excessiva	Fissuração com instabilidade local	6	IV	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	2	II	12	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	36
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	18	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	4	72
			Fissuração com instabilidade global e ruptura	9	V	Erro de projeto (propriedades dos materiais)	2	II	18	Utilização de critérios de projeto consolidados no meio técnico	3	54
					I	Erro de construção (compactação)	3	II	27	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	4	108

Função	Modo de Falha	Efeito Final	S	Causa	O	Crit.	Controle	D	NPR			
5.1.1. Aterro												
Servir como elemento de vedação no contato com o muro de transição	5.1.1.(1)	Percolação excessiva	Piping	9	I	Falha no dimensionamento da transição (erro de projeto)	2	II	18	Execução de sistema de filtro para a barragem	3	54
						Alívio da tensão no contato aterro-concreto ou aterro-fundação	4	III	36	Monitoramento com células de pressão total e piezômetros	3	108
						Falha na compactação (erro de construção)	3	II	27	Recompactação e monitoramento/ inspeção regular	3	81
						Fissuração interna devido a recalques excessivos	3	II	27	Injeção e realização de reforços	3	81
5.1.2. Transição aterro-enrocamento												
Permitir a mudança de granulometria do material sem carreamento de finos	5.1.2.(1)	Carreamento de material do aterro	Piping	9	I	Material inadequado (erro de projeto)	2	II	18	Execução de sistema de filtro para a barragem	4	72
						Falha construtiva (compactação)	3	II	27	Monitoramento da percolação e execução de sistemas de filtro	4	108
5.1.3. Mureta pé do enrocamento (montante)												
Apoiar o pé do enrocamento a montante	5.1.3.(1)	Colapso da estrutura	Perda de apoio no pé do enrocamento de montante, podendo ocasionar instabilidade local	6	I	Instabilidade global da estrutura (deslizamento, tombamento ou flutuação)	2	II	12	Verificação da estabilidade da estrutura para diferentes casos de carregamento	3	36
						Carregamentos excepcionais	2	II	12		3	36
5.2. Galeria de drenagem e injeção												
Permitir a saída da vazão dos drenos de fundação e acesso à	5.2.(1)	Incapacidade de expulsar as águas percoladas	Aumento da subpressão sob a estrutura, com possibilidade de instabilidade global	7	IV	Falha nas bombas	3	II	21	Dimensionamento adequado das bombas e dos sistemas de alimentação, com teste periódicos	4	84
					I	Sistema de canaletas de drenagem inadequado	4	III	28	Realização de redimensionamento das canaletas, aumentando a capacidade	2	56

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
local de perfuração de cortina de injeção			Perda do acesso à galeria	3	II	Inundação da galeria, inviabilizando o acesso	2	II	6	Esgotamento através de bombas e realização dos reparos necessários	1	6
5.3. Fundação												
Prover suporte para a barragem e enrocamento	5.3.(1)	Movimento de massa	Colapso da estrutura (ruptura)	10	VI	Plano de fragilidade na fundação,não identificado no reconhecimento geológico	2	II	20	Aumentar as investigações geológicas durante a etapa de projeto/ monitoramento da fundação	6	120
					I	Deslizamento na provável junta-falha sob a estrutura do muro de transição da margem esquerda	3	II	30		5	150
Reduzir a percolação pela fundação	5.3.(2)	Aumento da percolação	Piping	9	V	Carreamento de material de brecha subhorizontal	3	II	27	Monitoramento do aumento da percolação por meio de piezômetros	3	81
					I	Falha da cortina de injeção	4	III	36	Recomposição da cortina de injeção (perfuração a partir da galeria)	3	108
					I	Colmatação dos drenos	4	III	36	Limpeza dos drenos	2	72
		Aumento da subpressão	6	IV	Falha da cortina de injeção	4	III	24	Recomposição da cortina de injeção (perfuração a partir da galeria)	3	72	
				I	Colmatação dos drenos	4	III	24	Limpeza dos drenos	2	48	
				I	Abertura do contato concreto-rocha a montante	3	II	18	Monitoramento com extensômetros múltiplos de haste/ verificação da estabilidade global para o caso de drenos inoperantes	3	54	
5.3.1. Instrumentação da Fundação												

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
Monitorar a percolação na brecha basáltica abaixo da estrutura da margem direita	5.3.1.(1)	Falha nos piezômetros	Impossibilidade de monitoramento da estrutura	5	III	Excesso de finos no aterro ou fundação	3	II	15	Limpeza dos piezômetros	3	45
Monitorar a percolação de provável junta-falha abaixo da estrutura da margem esquerda	5.3.1.(2)	Falha nos piezômetros	Impossibilidade de monitoramento da estrutura	5	III	Excesso de finos no aterro ou fundação	4	III	20	Limpeza dos piezômetros	3	60
6. Barragem de Gravidade												
Garantir estabilidade e conter o reservatório	6.(1)	Instabilidade global (deslizamento, tombamento ou flutuação)	Ruptura da estrutura civil, com liberação descontrolada de água	10	VI	Carregamentos excepcionais (subpressão, sismo, assoreamento, etc)	4	III	40	Verificação de estabilidade global para os casos de carregamento excepcionais/ rebaixamento do reservatório	3	120
					I	Erro de projeto	2	II	20	Realização de reforços na estrutura	2	40
	6.(2)	Reações deletérias no concreto armado (RAA, etringita tardia, carbonatação)	Fissuração e aumento da percolação pela barragem	7	IV	Percolação excessiva devido a porosidade do concreto (erro de traço ou construtivo)	4	III	28	Recomposição da superfície do concreto ou utilização de mantas/ inspeção visual	3	84
					I	Utilização de agregados reativos	3	II	21	Utilização de cimento com pozolanas	4	84
					I	Elevado calor de hidratação do concreto	5	III	35	Utilização de técnicas para redução do calor de hidratação (redução do consumo de cimento, utilização de gelo no concreto, etc)	3	105
			Fissuração e aumento da percolação pelas paredes	4	III	Lixiviação do concreto (aumento da porosidade)	6	III	24	Inspeção visual/ impermeabilização da face da estrutura	1	24
	6.(3)	Recalque	Ruptura dos veda-juntas	5	III	Problemas na fundação	3	II	15	Monitoramento com extensômetros múltiplos de haste/	4	60

Função	Modo de Falha		Efeito Final	S		Causa	O		Crit.	Controle	D	NPR
		diferencial entre blocos	(aumento da percolação)		I	(movimentação de camadas geológicas)			15	verificação da estabilidade global e rebaixamento do reservatório em caso de risco elevado		60
					I	Reações expansivas no concreto	3	II	15	Criação de juntas de alívio para expansão controlada do concreto/ impermeabilização da superfície para reduzir as reações expansivas/ análise da estabilidade e das tensões máximas no concreto	4	60
					I	Carregamentos excepcionais (subpressão, sismo, assoreamento, etc)	4	III	20	Verificação de estabilidade global para os casos de carregamento excepcionais/ rebaixamento do reservatório	3	60
					I	Dilatação térmica dos blocos	5	III	25	Monitoramento com medidores triortogonais e medidores de vazão	2	50
6.1. Galeria de drenagem e injeção												
Permitir a saída da vazão dos drenos de fundação e acesso ao local de perfuração de cortina de injeção	6.1.(1)	Incapacidade de expulsar as águas percoladas	Aumento da subpressão sob a estrutura, com possibilidade de instabilidade global	8	IV	Falha nas bombas	3	II	24	Dimensionamento adequado das bombas e dos sistemas de alimentação, com teste periódicos	4	96
					I	Sistema de canaletas de drenagem inadequado	4	III	32	Realização de redimensionamento das canaletas, aumentando a capacidade	3	96
			Perda do acesso à galeria	4	III	Inundação da galeria, inviabilizando o acesso	2	II	8	Esgotamento através de bombas e realização dos reparos necessários	2	16
6.2. Fundação												
Prover suporte para a barragem e enrocamento	6.2.(1)	Movimento de massa	Colapso da estrutura (ruptura)	10	VI	Plano de fragilidade na fundação,não identificado no reconhecimento geológico	2	II	20	Aumentar as investigações geológicas durante a etapa de projeto/ monitoramento da fundação	6	120

Função	Modo de Falha	Efeito Final	S	Causa	O	Crit.	Controle	D	NPR
Reduzir a percolação pela fundação	6.2.(2)	Aumento da percolação	9	V	Carreamento de material de brecha subhorizontal	3 II 27	Monitoramento do aumento da percolação por meio de piezômetros	3	81
				I	Falha da cortina de injeção	4 III 36	Recomposição da cortina de injeção (perfuração a partir da galeria)	3	108
				I	Colmatação dos drenos	4 III 36	Limpeza dos drenos	2	72
		Aumento da subpressão	6	IV	Falha da cortina de injeção	4 III 24	Recomposição da cortina de injeção (perfuração a partir da galeria)	3	72
				I	Colmatação dos drenos	4 III 24	Limpeza dos drenos	2	48
				I	Abertura do contato concreto-rocha a montante	3 II 18	Monitoramento com extensômetros múltiplos de haste/ verificação da estabilidade global para o caso de drenos inoperantes	3	54