

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Giovanna Sônia Motta Mancilha

**LEVANTAMENTO DAS METODOLOGIAS DE AVALIAÇÕES DE
RISCO EM BARRAGENS**

Taubaté
2020

GIOVANNA SÔNIA MOTTA MANCILHA

**LEVANTAMENTO DAS METODOLOGIAS DE AVALIAÇÕES DE
RISCO EM BARRAGENS**

Trabalho de Conclusão de Curso para
obtenção do Título de Graduação em
Engenharia Ambiental e Sanitária do
Departamento de Engenharia Civil da
Universidade de Taubaté.

Prof. Orientador: Dr. Ademir Fernando
Morelli

**Taubaté – SP
2020**

GIOVANNA SÔNIA MOTTA MANCILHA

LEVANTAMENTO DAS METODOLOGIAS DE AVALIAÇÕES DE RISCO EM BARRAGENS

TCC apresentado para obtenção do Certificado de Graduação pelo Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: _____

Data: _____

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ademir Fernando Morelli

Universidade de Taubaté

Assinatura: _____

Prof. Me.

Universidade de Taubaté

Assinatura: _____

Convidado

Engenheiro Ambiental e Sanitarista

Assinatura: _____

*Dedico este trabalho aos meus pais.
A toda minha família, em especial, a minha
vó Sônia (in memória).
A todos os meus amigos.
E aos professores do curso de Engenharia
Ambiental e Sanitária da Universidade de
Taubaté.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, o criador que foi criativo. Sua proteção me foi sustento e me deu coragem para questionar realidades e propor sempre um novo mundo de possibilidades.

À minha família, por acreditar e investir em mim. Em especial meus pais, Márcia Cristina Motta Mancilha e Geraldo Luiz Mancilha, seus cuidados e dedicação foram o que me deram, em muitos momentos, força para continuar. A presença de vocês significou segurança e a certeza de que não estou sozinha nessa caminhada. Esse mérito é de vocês também.

Aos meus amigos, por todo estímulo ao longo da minha trajetória acadêmica e por toda lealdade ao longo da minha vida.

A toda família dos elegantes e busca-pé, por todo incentivo e amor.

A minha Vó Sônia (*in memoriam*), cuja presença foi essencial em minha vida. Meu maior exemplo de um ser humano íntegro, bondoso e ético.

A todos os professores do curso, que foram tão importantes na minha trajetória estudantil, em especial meu orientador Ademir Fernando Morelli, pela paciência e incentivo na orientação que tornaram possível a conclusão desta monografia.

Agradeço ao mundo por mudar as coisas, por nunca as fazer serem da mesma forma, pois assim não teríamos o que pesquisar, o que descobrir e o que fazer.

A minha amada Rep. CaiPiradas, com participação das Engeloukas e Meninas do Marerê, que em meio as madrugadas calculando deixaram tudo ainda mais prazeroso, feliz e divertido. ARRUPI!

*“O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder
o entusiasmo!”*

(Winston Churchill)

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema Integrado de Segurança de Barragens.....	6
Figura 2. Pilares básicos da segurança de barragens.....	7
Figura 3. Etapas do processo de gestão de riscos em barragens.....	15
Figura 4. Atividades fundamentais na gestão de riscos.	16
Figura 5. Características das Árvores de Eventos.....	25
Figura 6. Exemplo de Árvore de Falha (FTA).....	26
Figura 7. Etapas de Descrição do Modo Potencial de Falha (PFMA).....	29
Figura 8. Representação esquemática do método nó borboleta	30

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1. Exemplo ilustrativo de aplicação do método FMEA.....	22
Quadro 2. Exemplo ilustrativo de aplicação do método HAZOP.	28

RESUMO

Os riscos associados ao rompimento de barragens são, na maioria dos casos, de grandes proporções. Envolvem ameaças à vida humana, danos materiais, ambientais e sociais. A gestão de segurança de barragens apresenta, tradicionalmente, uma abordagem orientada para a segurança (centrada nas obras), porém é necessário evoluir para abordagens orientadas para o risco, buscando tratar as ações, desempenho e consequências de forma integrada. O objetivo geral do presente trabalho foi realizar o levantamento das metodologias mais utilizadas para realização de avaliações de risco em barragens. A metodologia utilizada foi a da revisão de literatura. Ainda existe uma grande dificuldade em incorporar as análises de risco aos processos de gerenciamento de segurança de barragens. É importante que os ganhos de conhecimento advindos das análises possam ser contabilizados por todos os envolvidos na gestão da barragem e que os riscos identificados sejam gerenciados com base nos estudos realizados.

Palavras-chaves: Barragens. Segurança. Análise de Riscos. Riscos Ambientais.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Geral	3
2.2. Específicos.....	3
3. REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1. CONCEITOS DE RISCOS	4
3.2. RISCOS ASSOCIADOS A BARRAGENS.....	5
3.3. FONTES DE RISCOS EM BARRAGENS.....	8
3.3.1. Riscos ligados a fatores naturais ou ambientais.....	8
3.3.2 Riscos associados a fatores dependentes da barragem	10
3.3.3 Riscos ligados a fatores socioeconômicos	14
3.4 GESTÃO DE RISCOS EM BARRAGENS.....	14
3.4.1 Avaliação de riscos	17
3.4.2 Análise de riscos	17
3.4.3 Apreciação de riscos.....	18
3.4.4 Controle de risco.....	18
3.5 ANÁLISE DE RISCOS	19
3.5.1 Principais Metodologias de Análises de Risco em Barragens	20
3.5.1.1 <i>Análise dos modos de falha e seus efeitos (FMEA - Failure Mode and Effect Analysis)</i>	20
3.5.1.2 <i>Análise por árvore de eventos (ETA - Event Tree Analysis)</i>	23
3.5.1.3 <i>Análise Árvore por Falhas (FTA – Fault Tree Analysis)</i>	25
3.5.1.4 <i>Análise de Perigo e Operacionalidade (Método HAZOP)</i>	26
3.5.1.5 <i>Análise dos modos de falha potenciais (Potencial Failure Modes Analysis – PFMA)</i>	29
3.5.1.6 <i>Método Noed Papillon (Nó Borboleta)</i>	30
4. CONCLUSÃO.....	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

1.INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas que têm sido utilizadas por diversas civilizações há milhares de anos. Além da função de armazenamento de água para o abastecimento humano, irrigação e dessedentação de animais, as barragens também podem ser utilizadas para a geração de energia, controle de cheias, recreação, piscicultura, retenção de resíduos e navegação.

São geralmente obras associadas a um elevado potencial de risco devido à possibilidade de ruptura, com consequências catastróficas para as próprias estruturas, para o meio ambiente, com destruição de flora e fauna, e principalmente pela perda de vidas humanas e econômicas.

Elas exercem um importante papel social e econômico, mas também têm potencial para causar diversos impactos negativos, principalmente quando não são devidamente planejadas, projetadas, construídas, operadas ou mantidas. Além dos impactos inerentes à construção destes empreendimentos, deve-se considerar também o risco que estas estruturas impõem, principalmente para o vale de jusante, em decorrência da possibilidade de ruptura da barragem.

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

São muitos os casos de rompimento de barragens que vêm causando grandes prejuízos, tanto individuais como à sociedade, desde as estruturas mais simples, utilizadas por pequenos proprietários de terra, até barragens de rejeitos. As causas dos rompimentos são das mais diversas, independente do porte da barragem, portanto foram levantadas na literatura metodologias que levassem em consideração comportamentos previsíveis que são capazes de levar tais estruturas à ruptura.

Em média, ocorrem dez rompimentos significativos de barragens em algum lugar do mundo a cada década, adicionando-se, ainda, os “quase rompimentos”. As falhas mais comuns que podem ocorrer em barragens são devidas a: enchentes extremas, incertezas geológicas no local escolhido para implantação, perdas de água

através das fundações e aterros, defeitos de construção e projeto e sismicidade (ZUFFO, 2005).

De acordo com o Relatório de Segurança de Barragens - RSB, elaborado pela Agência Nacional de Águas - ANA, referente ao ano de 2017 (ANA, 2017), o Brasil registra em média quatro acidentes com barragens a cada ano. Há evidências, no entanto, de que tal estatística possa ser bem maior: a própria agência reconhece em seu relatório que há acidentes não relatados e mesmo barragens que não foram informadas ao governo federal.

Os riscos associados ao rompimento de barragens são, na maioria dos casos, de grandes proporções. Envolvem ameaças à vida humana, danos materiais, ambientais e sociais. Além disso, o arranjo espacial de uma barragem favorece a propagação do desastre em grande escala, uma vez que essas comumente situam-se em vales de rios, córregos e afluentes ocupados a jusante por núcleos urbanos e demais formas de adensamento populacional.

Segundo Pimenta (2009), a gestão de segurança de barragens apresenta, tradicionalmente, uma abordagem orientada para a segurança (centrada nas obras), porém é necessário evoluir para abordagens orientadas para o risco, buscando tratar as ações, desempenho e consequências de forma integrada.

Um dos pilares da gestão voltada para o risco é o Plano de Ação de Emergência - PAE. Partindo do princípio que a segurança absoluta não pode ser garantida e existe o risco de ruptura da barragem, o PAE visa estabelecer um conjunto de ações de resposta para atuação em situações críticas, a fim de evitar a ocorrência de acidentes ou minimizar suas consequências.

As ações de resposta durante situações críticas em barragens envolvem, normalmente, processos de tomada de decisão muito complexos, onde diversas variáveis devem ser consideradas em um curto espaço de tempo, sendo que decisões equivocadas podem levar, inclusive, à perda de vidas humanas.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Realizar o levantamento das metodologias mais utilizadas para realização de avaliações de risco em barragens.

2.2. Específicos

- a) Avaliar as principais fontes de risco em barragem;
- b) Pesquisar as principais metodologias de avaliação de risco em barragens de rejeitos de mineração;
- c) Discutir as metodologias utilizadas na avaliação de risco.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. CONCEITOS DE RISCOS

Falar de “risco” é falar, simultaneamente, de oportunidade e de incerteza. Esta grandeza possui múltiplos significados na linguagem corrente e na terminologia técnico-científica, é um indicador de segurança e um operador de decisão (FUSARO; DIAS, 2011).

Uma definição simples e objetiva do risco é fornecida pelo Webster’s Dictionary: a possibilidade de perda (*the possibility of loss*), ou seja, a possibilidade da ocorrência de um evento e as consequências adversas (perdas) provocadas pela ocorrência (USBR, 2003).

De acordo com Bernstein (1997), o termo risco é uma derivação do italiano antigo *riscare*, que, por sua vez, deriva do baixo latim *risicu*, *riscu*, que significa ousar. Na percepção de Cohen (2004), risco consiste simplesmente no potencial existente em termos de complicações e problemas relacionados à conclusão de uma tarefa ou à realização de uma meta em um projeto.

Uma vez que o risco é inerente a todas as atividades de uma iniciativa (ou projeto) e, como tal, nunca pode ser totalmente eliminado, seus impactos podem ser mitigados para efeito de consecução dos objetivos. Assaf Neto (2001), entende o risco como sendo esse a associação direta das probabilidades do alcance de determinados resultados, em relação a uma determinada expectativa. De forma similar, Vaughan (2007), conceitua risco como sendo uma condição na qual existe possibilidade de desvios adversos em relação aos resultados esperados.

O risco é inerente a qualquer iniciativa, e nossa cultura aceita o risco como o motor propulsor do progresso. O risco, portanto, deve ser reconhecido como onipresente e considerado um parâmetro do cotidiano em qualquer atividade humana (CALIL, 2009).

Em engenharia, os riscos estão basicamente associados à resistência dos materiais, à estabilidade das estruturas e ao desempenho de máquinas, equipamentos e instalações (VIEIRA, 2005), quer sob o ponto de vista operacional, quer sob o ponto de vista do atingimento dos objetivos pré-estabelecidos, sejam eles econômicos, sociais ou ambientais.

3.2. RISCOS ASSOCIADOS A BARRAGENS

No que concerne à segurança de barragens, estamos a tratar de um risco de ordem operacional, tecnológica, usualmente atribuído como as consequências esperadas associadas à ocorrência de um evento adverso (LEITE, 2019).

Ainda segundo Leite (2019), o risco operacional está associado ao risco resultante da execução dos processos de negócio de uma empresa. Trata-se de um conceito amplo, que pode incluir muitos riscos diferentes que colocam em causa a normal execução do negócio. Sua administração concentra-se na prevenção, controle e mitigação de eventos que impliquem perdas.

Fusaro e Dias (2011) relatam que quando se fala de barragens, está se tratando de um risco tecnológico, usualmente definido como as consequências esperadas associadas à ocorrência de um evento adverso. Em linguagem matemática:

$$\text{Risco} = \text{Probabilidade} \times \text{Consequência}$$

Ou ainda:

$$\text{Risco} = P(\text{evento}) \times P(\text{reação adversa para dado evento}) \times \text{Consequência do evento}$$

Em Segurança de Barragens os termos “incidente” e “acidente” são utilizados de modo recorrente e basicamente diferenciam-se pela magnitude do problema, o que, a exemplo dos conceitos discutidos anteriormente, de certa forma tem caráter subjetivo, causando certa confusão (LEITE, 2019).

Vieira (2000), desmembra estes conceitos de forma mais conveniente definindo acidente como um evento de grande porte correspondente à ruptura parcial ou total de obra e/ou a sua completa disfuncionalidade, com graves consequências econômicas e sociais e incidente é um evento físico indesejável, de pequeno porte, que prejudica funcionalidade e/ou a inteireza da obra, podendo vir a gerar eventuais acidentes, se não corrigido a tempo.

Seguindo a linha e técnicas da norma legislativa, a Resolução CNRH nº 144/2012 (BRASIL, 2012), inicia com as seguintes definições de acidente e incidente:

1 - Acidente: comprometimento da integridade estrutural com liberação incontrolável do conteúdo de um reservatório ocasionado pelo colapso parcial ou total da barragem ou estrutura anexa;

2 - Incidente: qualquer ocorrência que afete o comportamento da barragem ou estrutura anexa que, se não for controlada, pode causar um acidente.

A segurança deve constituir o objetivo fundamental no projeto, construção e operação de barragens. Este deve ser referencial a ser buscado, uma vez que a ruptura de uma barragem pode ter consequências imensuráveis em termos de impactos socioeconômicos e ambientais.

Sabendo-se então da existência de uma probabilidade, ainda que baixa, de ruptura de uma barragem e do alto impacto que este evento teria a jusante, a questão é como este risco pode ser reduzido.

Um conceito que ultimamente vem sendo considerado como o mais completo para o controle da segurança de barragens é o chamado Sistema Integrado de Segurança (PERINI, 2009; ALMEIDA, 2011) que distingue a questão sobre três pilares:

1. Técnico-Operacional (T-O);
2. Monitoramento-Vigilância (M-V);
3. Gestão de Riscos / Emergência (G-E).

Cada pilar deve ser entendido como condição necessária para a segurança, mas não suficiente (PERINI, 2009). Sendo, portanto, dimensões complementares e não excludentes, que, em conjunto, mantém a barragem segura durante as diversas fases de vida (Figura 1).



Os dois primeiros componentes do Sistema Integrado de Segurança fazem parte das medidas tradicionais do sistema de segurança, sendo o Técnico-Operacional responsável pelo controle da segurança estrutural, hidráulica e

operacional, e o Monitoramento-Vigilância pelo monitoramento, inspeção, detecção e análise da obra. Já o de Gestão de Riscos / Emergência compreende a implementação e preparação de todas as medidas e procedimentos necessários para o controle dos riscos e para dar uma resposta aos eventuais acidentes que possam ocorrer numa barragem, com o objetivo de antecipar a detecção de crises e falhas (PERINI, 2009; ALMEIDA, 2011)

De forma semelhante, Biedermann (1997) considera que a segurança de barragens pode ser obtida apoiando-se em três pilares básicos: segurança estrutural (projeto, construção e manutenção adequados), monitoramento e gestão de emergência, conforme apresenta a Figura 2.

Figura 2. Pilares básicos da segurança de barragens.



Fonte: adaptado Biedermann (1997)

Nas fases de projeto e construção, devem ser feitos investimentos de forma que os riscos associados a cada estrutura civil sejam minimizados. Todavia, mesmo sendo o projeto e construção adequados, existe um risco remanescente a ser controlado através de um processo de acompanhamento e avaliação permanentes do desempenho das estruturas. Este processo é usualmente denominado de auscultação de barragens, e engloba as atividades de observação, detecção e caracterização de eventuais deteriorações que possam aumentar o potencial de risco de uma estrutura (FONSECA, 2003; FUSARO; DIAS, 2011).

De acordo com Leite (2019), as ações de monitoramento serão pouco efetivas se, quando detectadas necessidades de manutenção (reparo ou melhorias), estas não forem realizadas em tempo hábil. O terceiro pilar da segurança, a gestão de emergências, assume que a segurança só pode ser garantida por meio da adoção de medidas integradas de gerenciamento de risco por meio das partes interessadas pelo sistema, a saber: responsáveis pela barragem, instituições reguladoras e público.

3.3. FONTES DE RISCOS EM BARRAGENS

As barragens, assim como outras estruturas de engenharia, estão sujeitas a incidentes e acidentes. Conforme expõe Piasentin (2003; 2005), os incidentes de barragens decorrem do desenvolvimento de comportamentos anômalos ou inesperados em tais estruturas.

Incidentes são entendidos como o resultado de processos defeituosos envolvendo interação entre os componentes dos sistemas envolvidos, incluindo: pessoas, estrutura organizacional e social, atividades de engenharia e componentes físicos (CALIL, 2009).

Anomalias, por sua vez, podem apresentar diversos sintomas, que raramente podem ter uma única causa, mas que geralmente podem ter diversas causas que ocorrem em simultâneo ou em sequência com a acumulação de efeitos no tempo. Essas causas ou anomalias, identificadas como fatores de risco, de modo geral são sistematizadas em aspectos relativos ao homem, ao ambiente e à máquina (ou ao sistema técnico, em uma visão mais abrangente) (LEITE, 2019).

Conforme verificado por Perini (2009) e Baima (2015), o Brasil não mantém estatística ou registro oficial sobre o número e tipo de incidentes, causas prováveis ou dos danos causados, sendo os levantamentos realizados de forma independente pelos pesquisadores, de acordo com a necessidade de suas pesquisas. Essa realidade permanece.

3.3.1. Riscos ligados a fatores naturais ou ambientais

São os riscos associados a fenômenos naturais e que estariam, de certa forma, fora do controle direto do ser humano.

3.3.1.1 Riscos Hidrológicos

O risco hidrológico é a probabilidade de falha de uma estrutura hidráulica face a ocorrência de vazão superior àquela para a qual foi dimensionada. Matematicamente é definido como produto entre a probabilidade de ocorrência de uma cheia associada a um determinado período de retorno e os danos que se esperam dessa ocorrência (MELO, 2014).

Ao projetar, instalar e operar um aproveitamento de recursos hídricos, o engenheiro deve presumir a coexistência desse empreendimento com um vale já sujeito a cheias e estiagens, em decorrência da variabilidade climática e seu nível de ocupação, muitas vezes com população e infraestrutura significativas e, portanto, vulneráveis ao impacto de uma falha estrutural ou de funcionamento da obra hidráulica que venha a ser implantada a montante (FUSARO; DIAS, 2011).

De acordo com Fusaro e Dias (2011), o risco hidrológico costuma ser avaliado como o produto entre a probabilidade de ocorrência de uma cheia associada a um determinado período de retorno e os danos que se espera dessa ocorrência.

3.3. 1.2 Sismicidade

De acordo com Melo (2014), um sismo é um fenômeno de vibração brusca e passageira da superfície da Terra, resultante de movimentos subterrâneos de placas rochosas, de atividade vulcânica, ou por deslocamentos de gases no interior da Terra, principalmente metano. O enchimento de reservatórios formados pela construção de barragens ou açudes pode induzir a ocorrência de sismos e eventualmente produzir danos severos a essas estruturas e benfeitorias vizinhas.

A ocorrência de um sismo natural ou induzido pode ter como consequências (FUSARO; DIAS, 2011):

- Queda de blocos de rocha e escorregamento de taludes, podendo danificar comportas, estruturas da casa de força, equipamentos eletromecânicos, condutos etc.;
- Movimentos de massa para dentro do reservatório, formando ondas que podem vir a galgar a barragem;
- Assentamentos e recalques por liquefação, adensamento do solo ou enrocamento, causando deformações na barragem.

Fusaro e Dias (2011) relatam que é recomendável que, ao construir uma usina hidrelétrica com grande reservatório, se avalie a necessidade de instalação de uma estação sismográfica antes do início do enchimento do reservatório, para que se possa conhecer a atividade sísmica do local antes e pós enchimento.

3.3.1.3 Escorregamento de massa em reservatórios

Possibilidade de escorregamento de taludes de terra ou rochosos nas margens dos reservatórios, movimentando uma massa significativa para dentro do lago, podendo vir a causar ondas significativas no reservatório e o galgamento da barragem (FUSARO; DIAS, 2011; LEITE, 2019).

3.3.1.4 Ações agressivas

Atuação das intempéries (chuva, vento, calor, frio) alternadamente sobre a barragem e estruturas associadas podendo causar, ao longo do tempo, desagregação, envelhecimento, erosão e corrosão, dentre outros fenômenos térmicos, mecânicos e químicos (MELO, 2014; FUSARO, 2005).

Como exemplo, Fusaro e Dias (2011) citam o processo físico de fragmentação das rochas devido a variações da temperatura, a ação do gelo e dos ventos, pelo enfraquecimento de suas estruturas e pela fragmentação devido aos diferentes coeficientes de dilatação dos minerais que as compõem.

3.3.2 Riscos associados a fatores dependentes da barragem

São riscos internos ao sistema barragem e impostos pela construção da estrutura do barramento, presentes nas fases de projeto, construção e operação.

3.3.2.1 Riscos na operação do reservatório

Vertedouros hidrológicamente subdimensionados e/ou apresentando grau de incerteza na determinação da capacidade de descarga devido a dimensionamento por critérios empíricos, dados cadastrais e informações geométricas inconsistentes (MELO, 2014).

Deve-se ter em mente a necessidade de regras operativas adequadas e a necessidade de manutenção dos dispositivos extravasores. O mau funcionamento das comportas coloca em risco todos os esforços e investimentos feitos no cálculo de cheias e construção de órgãos extravasores adequados.

São causas frequentes de falha no funcionamento de comportas (FUSARO; DIAS, 2011):

- Falta de energia;
- Obstruções provocadas por material transportado especialmente em períodos de cheia;
- Emperramento do equipamento de manobra;
- Impossibilidade de acesso do pessoal de operação ao comando dos equipamentos em situações de tempestade;
- Manutenção deficiente.

3.3.2.2 Riscos geológicos

Possibilidade de ocorrência de condições geológicas durante uma obra, diferentes daquelas previstas nos estudos de projeto, gerando impactos nas soluções adotadas no projeto, no prazo de execução e no custo da obra (MELO, 2014; FUSARO, 2005).

Atualmente existem duas componentes do risco geológico normalmente aceitas. A primeira diz respeito à ocorrência de fenômenos geológicos naturais que podem ameaçar um projeto, de maneira semelhante ao risco que afeta encostas, cidades e estradas. A segunda é a probabilidade da geologia efetivamente encontrada na obra se afastar das condições inicialmente previstas (FUSARO; DIAS, 2011).

Segundo Fusaro e Dias (2011), durante a operação do empreendimento deve ser constantemente monitorada a evolução das feições identificadas nas fases anteriores do projeto, bem como a integridade de tratamentos e suportes aplicados, com especial atenção às estruturas subterrâneas.

3.3.2.3 Riscos estruturais

Fatores ligados ao dimensionamento estrutural e geotécnico, que podem levar à falha de estruturas da barragem na resposta aos carregamentos a elas impostas.

De acordo com Fusaro e Dias (2011), os principais fatores são:

- Definição incorreta de carregamentos e de parâmetros de projeto.
- Incertezas nas propriedades dos materiais, materiais estes criados pela natureza por processos randômicos. Existem limitações financeiras, físicas, de tempo e mesmo inexistência ou limitações dos ensaios existentes. Desta forma, os parâmetros de projeto são extraídos de campanhas de investigações e ensaios via de regra limitados e, muitas vezes, são extraídos de bibliografia ou de informações relativas a obras similares.
- Variabilidade natural das propriedades dos materiais de construção, adicionando-se as introduzidas pelos métodos construtivos nas características dos materiais de construção do maciço.
- Simplificações inadequadas nos modelos matemáticos.
- Falta de aplicação da tecnologia disponível por baixo conhecimento ou desatualização técnica.
- Utilização de métodos construtivos inadequados.

3.3.2.4 Riscos associados ao monitoramento

Relativos ao controle permanente do comportamento das estruturas por meio das atividades de auscultação de barragens (manutenção preditiva), ou seja, das inspeções visuais e da análise dos dados da instrumentação instalada (MELO, 2014).

São eles:

- Inspeções visuais sem conhecimento dos aspectos de projeto e construção;
- Insuficiência de instrumentação ou instrumentação não condizente com os possíveis modos de falha da barragem;
- Falhas na coleta dos dados na instrumentação, com a introdução de erros nas leituras;
- Demora ou falta de análise dos dados da instrumentação;
- Deficiência na avaliação e gestão permanente dos riscos;

- Simplificação de avaliação e gestão de riscos em PCHs (correlacionando indevidamente pequena geração com estruturas pequenas).

3.3.2.5 Riscos técnico-organizacionais

Tratam-se dos fatores associados à gestão dos riscos pelas empresas de projeto, construção e operação dos empreendimentos. Considerando que a gestão de riscos engloba as fases de identificação, análise, apreciação, tratamento e monitoramento dos riscos, o estabelecimento de processos organizacionais que permitam esta gestão é de suma importância (FUSARO; DIAS, 2011).

3.3.2.6 Riscos associados a gestão de emergências

São aqueles relativos às respostas às emergências para se evitar uma ruptura ou, se esta for inevitável, reduzir as suas consequências na área industrial e no vale a jusante (FUSARO; DIAS, 2011):

- Incertezas na elaboração dos PAEs (incertezas nos parâmetros de ruptura, nas propagações das ondas de cheia, nos dados topográficos, nas avaliações dos danos a jusante);

- Falhas no planejamento das ações de resposta, como na avaliação da vulnerabilidade e exposição;

- Falha nos sistemas de comunicação, alerta e aviso;

- Falta de mapas de zoneamento de risco para planejamento e ordenamento do uso e ocupação do solo;

- Deficiência na manutenção do estado de prontidão.

3.3.2.7 Riscos de ruptura de barragens em cascata

Causados pela possibilidade de ruptura de uma barragem, causando uma onda de cheia e transbordamento de barragens existentes a jusante, podendo levá-las a ruptura (MELO, 2014; FUSARO, 2005).

Segundo Fusaro e Dias (2011), este risco dependerá principalmente de: Volume dos reservatórios e volumes armazenados pelo conjunto de barragens no momento da ruptura, capacidade de defluência dos órgãos extravasores das

barragens a jusante, amortecimento da cheia de ruptura ao longo do vale e no reservatório, tempo de viagem da onda de cheia gerada pela ruptura, tempo de identificação e notificação do evento, existência de ações previstas no PAE para esta situação de risco.

3.3.3 Riscos ligados a fatores socioeconômicos

São riscos externos ao sistema barragem e associados às consequências humanas e econômicas no caso de ruptura (MELO, 2014).

A determinação destas consequências diferencia-se de outros ramos de negócio devido ao grande impacto que exerce fora dos limites da área onde está instalada. Além dos prejuízos ao próprio negócio, os danos provocados se estendem por todo o vale a jusante onde está instalado, o que torna complexa a mensuração e agrava substancialmente o risco percebido (DIAS, 2010).

De maneira geral, as consequências são mais altas, quanto mais próximas estiverem às ocupações humanas a jusante da barragem em questão, ou seja, o número de perda de vidas esperado é tanto maior quanto menor for o tempo para a retirada da população exposta ao risco das planícies de inundação (FUSARO; DIAS, 2011).

Fusaro e Dias (2011) ainda ressaltam que estes mesmos fatores, que são tratados como consequências de uma ruptura, também podem ser vistos como riscos ao sistema vale-barragem, uma vez que podem apresentar variações no tempo após a construção da barragem, fora do controle dos empreendedores:

- Aumento da população no vale a jusante;
- Ocupação indevida de áreas da planície de inundação ao longo do curso do rio a jusante da barragem;
- Aumento da infraestrutura existente a jusante (vias de acesso, instalações residenciais, agrícolas e industriais) devido ao crescimento econômico, crescimento populacional, crescimento de áreas urbanas e industriais.

3.4 GESTÃO DE RISCOS EM BARRAGENS

Gerenciamento de risco é uma abordagem científica para lidar com os riscos puros, de maneira a antecipar possíveis perdas acidentais e implementar

procedimentos que minimizem a ocorrência da perda. Não tem por objetivo eliminar todos os riscos, mas tornar mais eficiente o uso dos recursos disponíveis, incorporando no processo de decisão, uma otimização do comportamento perante os riscos (VAUGHAN, 2007).

Salmon e Hartford (1995), defendem o uso do processo de gestão baseado no risco como uma melhoria na prática tradicional da gestão da segurança de barragens, na qual os três componentes fundamentais - monitoramento, revisões periódicas de segurança e procedimentos de manutenção e operação - são as atividades centrais do processo.

Apesar dos acidentes envolvendo grandes barragens não serem muito frequentes, suas consequências são normalmente catastróficas. Visando contornar este cenário, teve início o desenvolvimento do conceito atual de gestão de risco no âmbito da segurança de barragens (VIANNA, 2015).

A análise de risco em barragens pode ser considerada um processo sistemático composto pelas seguintes etapas (Figura 3):

Figura 3. Etapas do processo de gestão de riscos em barragens



Fonte: Perini (2009).

No meio técnico de barragens, podemos verificar que as três primeiras etapas são, muitas vezes, denominadas de Análise de Risco em Barragens, como mostrado na definição a seguir:

Por análise de riscos entende-se o conjunto de procedimentos referentes à identificação dos acontecimentos indesejáveis, que conduzem a materialização dos riscos, à análise dos mecanismos que desencadeiam esses acontecimentos e à determinação das respostas das estruturas e das respectivas consequências (estimativa da extensão, da amplitude e da probabilidade da ocorrência de perdas) (PINTO, 2008).

De forma parecida, Pimenta (2009) define gestão de riscos como o desenvolvimento integrado das atividades de análise de riscos e de controle de risco. No controle de risco são elencadas como medidas cabíveis: mitigação, prevenção, detecção, planejamento de emergência, revisão e comunicação do risco, conforme apresenta a Figura 4.

Figura 4. Atividades fundamentais na gestão de riscos.



Fonte: Pimenta (2009).

O Risco é usualmente definido como o produto da probabilidade de ocorrer um evento pela sua consequência. A identificação dos modos de falhas é considerada uma etapa preliminar na avaliação de riscos, sendo de fundamental importância. Segundo Caldeira (2005), é importante que a identificação dos riscos seja realizada de forma exaustiva e sistemática. Para Foster, Spannagle e Fell (1998), a parte mais crítica de qualquer avaliação de riscos é a identificação completa dos cenários que resultam nas falhas.

Este conceito de gestão de riscos consiste em um conjunto de atividades integradas, tais como a avaliação de risco (análise de risco e apreciação de risco) e controle de risco (mitigação, prevenção, detecção, plano de ação de emergência -

PAE, revisão e comunicação). Essa nova abordagem insere-se como uma melhoria da prática tradicional e não como um senso de substituição (MELO, 2014).

De acordo com Hartford e Baecher (2004), o processo de análise de risco geralmente envolve as etapas de definição de escopo e seleção do método de análise, definição e identificação das condições de perigo, estimativa da probabilidade de falha da barragem e consequência, estimativa do risco, documentação, verificação e atualização da análise.

Os métodos de análises de risco podem ser de natureza qualitativa ou quantitativa. Os métodos de caráter qualitativo se apoiam em formas descritivas ou escalas de ordenação numérica para descrever as grandezas de probabilidade e consequência, enquanto que os quantitativos explicitam as incertezas, baseando-se, portanto, em valores numéricos da probabilidade e consequência (MELO, 2014). As análises qualitativas, que normalmente são menos complexas, podem ser utilizadas como uma avaliação preliminar visando estabelecer quais aspectos serão estudados com maior profundidade (VIANNA, 2015).

De acordo com Leite (2019), a Gestão de Riscos é um procedimento iterativo, subdividido em etapas, cuja realização resulta num ciclo que proporciona um aprimoramento contínuo das tomadas de decisão, promovendo um incremento permanente de desempenho.

3.4.1 Avaliação de riscos

Uma vez definido o contexto em que se dará a gestão e os critérios de referência, o próximo passo é a avaliação dos riscos. A avaliação de risco pode ser definida como o processo de tomada de decisão se os riscos são toleráveis e as medidas de controle são adequadas e, caso contrário, se as medidas de alternativas de controle do risco são justificadas ou serão implementadas (MELO, 2014).

3.4.2 Análise de riscos

A análise de riscos se baseia no uso da informação disponível para estimar o risco relativo a indivíduos ou populações, a propriedades ou ambientes, decorrentes de condições de perigo. Ela envolve a desagregação ou decomposição do sistema da barragem e fontes de riscos nas suas partes fundamentais (MELO, 2014).

Tendo em vista a necessidade de classificar e quantificar os riscos a Resolução CNRH nº 143/2012 apresenta critérios qualitativos para a classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo volume do reservatório. A Resolução CNRH nº 143/2012 considera risco como a possibilidade de ocorrência de acidente. Sua formulação, no entanto, diverge do formalmente definido e encontrado na literatura, estando restrito às características técnicas e de conservação da barragem e de suas estruturas associadas (ANDERÁOS; ARAÚJO; NUNES, 2013).

3.4.3 Apreciação de riscos

A atividade de apreciação de risco trabalha com a definição de critérios de aceitabilidade e tolerabilidade dos riscos (PIMENTA, 2009), constituindo um tema polêmico no âmbito da gestão de riscos (MELO, 2014) ao transcender o ambiente da engenharia, integrando a esses interesses políticos, sociais, econômicos e legais. Conforme destaca Perini (2009), critérios de Apreciação dos Riscos são na verdade julgamentos de valor e, portanto, de caráter não técnico.

Para estabelecer os critérios de tolerância é necessário conhecer o risco individual e o risco societal gerados pelo empreendimento. O risco individual equivale ao incremento de risco gerado pela existência desse novo empreendimento. No caso de barragens, esse incremento é o aumento do risco de morte, com o qual o indivíduo conviverá por ser diretamente afetado pelas consequências que uma eventual ruptura da barragem poderá causar (ICOLD, 2005; MELO, 2014).

Já o risco societal é aquele que assume consequências de grande escala e implicam em uma resposta do meio social e político, por meio de discussões públicas e mecanismos de regulação. O risco societal é tipicamente distribuído de maneira desigual, assim como os seus respectivos benefícios (ICOLD, 2005; MELO, 2014).

3.4.4 Controle de risco

O controle de risco encerra um conjunto de atividades integradas, englobando ações de decisão, redução, prevenção, detecção, planos de emergência, revisão e comunicação de riscos (PIMENTA, 2009).

Melo (2014), destaca que as três primeiras opções minimizam os riscos em que terceiros são expostos, enquanto que a quarta e a quinta opção não se aplicam para

o caso de barragens. Caldeira (2005), propõe uma análise de risco dividida em riscos quantitativos e qualitativos.

3.5 ANÁLISE DE RISCOS

A análise de riscos consiste basicamente no uso sistemático de informações disponíveis para determinar a frequência que eventos específicos podem ocorrer e a magnitude de suas consequências. A quantificação do risco é considerada uma das etapas mais complexas do processo de gerenciamento de riscos, já que pode envolver uma grande quantidade de variáveis de acordo com o grau de precisão desejado, além de incertezas (VIANNA, 2015).

Segundo Melo (2014), tanto as análises qualitativas quanto as quantitativas, de aplicações recentes em barragens, apresentam limitações importantes. Enquanto as qualitativas tendem a ser subjetivas, as quantitativas ainda se apresentam de aplicação restrita na área de barragens em virtude da dificuldade na caracterização analítica das incertezas envolvidas no processo. Pardo (2009) enfatiza que, na engenharia geotécnica, nenhuma das duas abordagens pode ser considerada totalmente adequada, pois não conseguem modelar a realidade por completo.

De acordo com Hartford e Baecher (2004), o processo de análise de risco geralmente envolve as seguintes atividades:

- ✓ Definição de escopo;
- ✓ Identificação e definição de carregamentos e perigos;
- ✓ Análises probabilísticas dos riscos e carregamentos;
- ✓ Identificação dos modos de falha; Resposta da barragem e análise da probabilidade de falha;
- ✓ Estimativa das consequências correspondentes a cada evento de falha;
- ✓ Estimativa do risco;
- ✓ Análises de incertezas e sensibilidade;
- ✓ Documentação;
- ✓ Análise de especialistas e/ou verificação (se possível);
- ✓ Atualização da análise (se necessário).

Existem diversas metodologias de Análise de Risco descritas na literatura, tais como:

3.5.1 Principais Metodologias de Análises de Risco em Barragens

Segundo o Grupo de Trabalho de Análise de Riscos em Barragens de Portugal (CNPGB, 2005) são seis os métodos de análise de risco, disponíveis na bibliografia especializada, que melhor se adequam às barragens:

3.5.1.1 Análise dos modos de falha e seus efeitos (FMEA - Failure Mode and Effect Analysis)

A partir de um modo de falha, avalia suas causas, a sequência de seus efeitos, os meios de sua detecção, de sua prevenção e de mitigação dos seus efeitos. Segundo Hartford (1999), é o método de análise por meio do qual as consequências de modos de falha de um componente são sistematicamente identificadas e analisadas.

A análise dos modos de falhas e efeitos - FMEA é uma forma de análise de confiabilidade que é usada para o mapeamento das consequências de eventos específicos que podem ocorrer durante a operação de um sistema de engenharia, e para identificar e priorizar as ações necessárias (HARTFORD; BAECHER, 2004).

Segundo Petronilho (2010), a análise FMEA é considerada uma das primeiras técnicas sistemáticas para a análise de falhas. O método teve sua origem em 1949, na norma *Military Standard Mil-STD-1629 – Procedures for performing a Failure mode, Effect and Criticality Analyses*, desenvolvida pelo exército norte-americano. Fora do âmbito militar, as aplicações mais antigas remontam aos anos 60, na indústria aeronáutica (INERIS, 2003). Atualmente tem sido utilizada em diversos setores como as indústrias química, petrolífera, nuclear e automobilística e contam já com algumas aplicações práticas no domínio das barragens.

A técnica foi desenvolvida originalmente para projetos, mas encontrou aplicações na análise do potencial de falha de sistemas existentes. Seu uso não fica restrito a sistemas de engenharia e já vem sendo aplicado em diversas áreas de atividades sociais, sendo a saúde um exemplo (HARTFORD; BAECHER, 2004).

A FMEA é um método de apoio a análises de risco qualitativas, extensível a análises semiquantitativas com a incorporação da criticalidade, por intermédio de escalas de probabilidade de ocorrência das falhas e de severidade dos efeitos. As análises semiquantitativas são geralmente denominadas FMECA (Análise dos modos

de falha, efeitos e criticalidade). Trata-se de uma avaliação indutiva e descritiva que promove, sem recorrer a formulações matemáticas, o conhecimento fundamentado da importância dos vários riscos através do raciocínio sistemático e lógico (PIMENTA, 2009).

De acordo com Melo (2014) em relação à implementação do método, existe uma grande variedade de layouts dos formulários de FMEA acessíveis na literatura, não existindo uma padronização. São usualmente apresentados de forma tabular. Geralmente, tais formulários abordam os seguintes itens:

- Identificação do sistema;
 - Identificação dos subsistemas, componentes (ou elementos);
 - Descrição da função dos componentes;
 - Modo de falha;
 - Efeito;
 - Causa;
 - Controle;
 - Índice de ocorrência (O) = probabilidade de a falha ocorrer;
 - Índice de severidade (S) = impacto ou gravidade dos efeitos da falha;
 - Índice de detecção (D) = eficiência (ou probabilidade) dos controles de detecção da falha;
- Número de prioridade de risco (NPR ou RPN – *Risk Priority Number*) = produto dos índices de ocorrência, severidade e detecção.

De acordo com Vianna (2015), as avaliações dos índices por classes e escalas numéricas são feitas de acordo com critérios previamente definidos. Cada autor utiliza uma classificação própria para pontuar os índices, existindo, portanto, uma gama enorme de diferentes tabelas. O ideal é que cada autor, ou empresa, tenha os seus próprios critérios adaptados à sua realidade específica. No caso da engenharia de barragens brasileira, a aplicação do FMEA em barragens de contenção de rejeitos já conta com alguns anos de experiência, mas no setor elétrico não é prática corrente.

O Quadro representa um exemplo do Método FMEA.

Quadro 1. Exemplo ilustrativo de aplicação do método FMEA

Código de identificação	Designação	Funcionamento	Modo de falha	Causa (acontecimento iniciador)	Efeitos da falha			Meios			Meios adicionais
					Locais	Noutros sub-sistemas	Terminais	de deteção do modo de falha	de prevenção do modo de falha	de mitigação dos efeitos	
3-1-1 (a-b-c) ⁽¹⁾	Galeria de desvio provisório	Desvio do rio durante a fase de construção. Operação em cheia.	Excedida a capacidade de escoamento da galeria em superfície livre (galeria projectada para funcionar em superfície livre, sem entrar em pressão)	Cheia superior à cheia de projecto	Escoamento em pressão no interior da galeria	Subida do nível da água na albufeira acima dos valores previstos	Perda de folga Galgamento da ensecadeira Onda de cheia no vale a jusante	Medição de caudais na bacia hidrográfica	Consideração de uma folga adequada a operações excepcionais.	Subida expedita do coroamento da ensecadeira.	Considerar a possibilidade de executar um descarregador de emergência sobre o corpo da ensecadeira
								Medição do nível da água na albufeira	Subida faseada dos aterros da ensecadeira (acima da cota do coroamento)	Accionamento do Plano de Emergência	Sistema de Aviso e Alerta

a - Sistemas principais

3-

- 1 - bacia hidrográfica
- 2 - albufeira
- 3 - barragem
- 4 - vale a jusante

b - Sub-sistemas da barragem

- 1 - galeria de desvio provisório
- 2 - ensecadeira
- 3 - corpo da barragem
- 4 - descarregador de cheias
- 5 - descarga de fundo
- 6 - tomada de água

c - Fase

- 1 - construção
- 2 - 1º enchimento
- 3 - exploração (primeiros 5 anos)
- 4 - exploração (após os primeiros 5 anos)

Segundo Hartford e Baecher (2004), uma limitação associada a estes métodos é a dificuldade de análise de redundâncias, uma vez que modos de falha de componentes individuais podem não resultar em efeitos observáveis no sistema ou determinados estados limite de alguns subsistemas podem não ter impacto no sistema global.

Um outro aspecto que poderá constituir uma limitação é o tratamento isolado dos estados limite de cada subsistema, não considerando efeitos combinados de estados limite simultâneos, do mesmo subsistema ou de diferentes subsistemas (VIANNA, 2015).

A materialização de alguns estados limite (ex.: perda de estabilidade global) pode implicar a análise conjunta de vários subsistemas (núcleo e maciços estabilizadores ou corpo da barragem e fundação) (PIMENTA, 2009). A FMEA, que é um registro, deve ser sempre revisada e atualizada, visando um processo de melhoria contínua.

De acordo com Hartford e Baecher (2004), pode ser utilizada tanto como um método único, como pode ser considerada um precursor para uma análise mais detalhada por árvores de eventos ou de falhas.

Vianna (2015) destaca que a FMEA é uma metodologia versátil, transparente e eficiente, sendo uma ferramenta bastante aceita e difundida entre os profissionais da área de análise de risco.

3.5.1.2 Análise por árvore de eventos (ETA - Event Tree Analysis)

Método de análise semi-quantitativo e quantitativo que permite calcular a probabilidade de ocorrência de sequências de eventos a partir de um determinado acontecimento iniciador que pode conduzir a falhas relevantes (COLLE, 2008).

Segundo Ladeira (2007), a análise por árvore de eventos é um método indutivo, que procura estabelecer relações entre eventos, a partir de um evento iniciador. Ele foi desenvolvido no início da década de 1970 em apoio a implementação de análises de riscos em centrais nucleares. Atualmente é utilizado nas mais diversas áreas técnico-científicas.

A árvore de eventos, geralmente utilizada para barragens, refere-se a modelos de sistemas físicos. São construções gráficas, dispostas em ordem cronológica (da esquerda para direita), onde se inicia a análise a partir de um perigo, ou evento iniciador, passando sucessivamente para a sequência lógica de ocorrência do evento e podendo culminar no efeito final. Cada ramo da árvore estratifica-se, binariamente, em dois ramos, representando uma situação de sucesso e outra de falha. O nó representa uma transição de estado do sistema (VIANNA, 2015).

Quando utilizada na forma quantitativa (ou semi-quantitativa) são explicitadas as probabilidades de ocorrência de cada sequência. O único requisito para o resultado das probabilidades dos eventos é que esses sejam mutuamente exclusivos, ou seja, quando a ocorrência de um desses eventos exclui a possibilidade de ocorrência dos outros, e coletivamente exaustivos, que significa que a união desses eventos equivale à população ou espaço amostral (MELO, 2014).

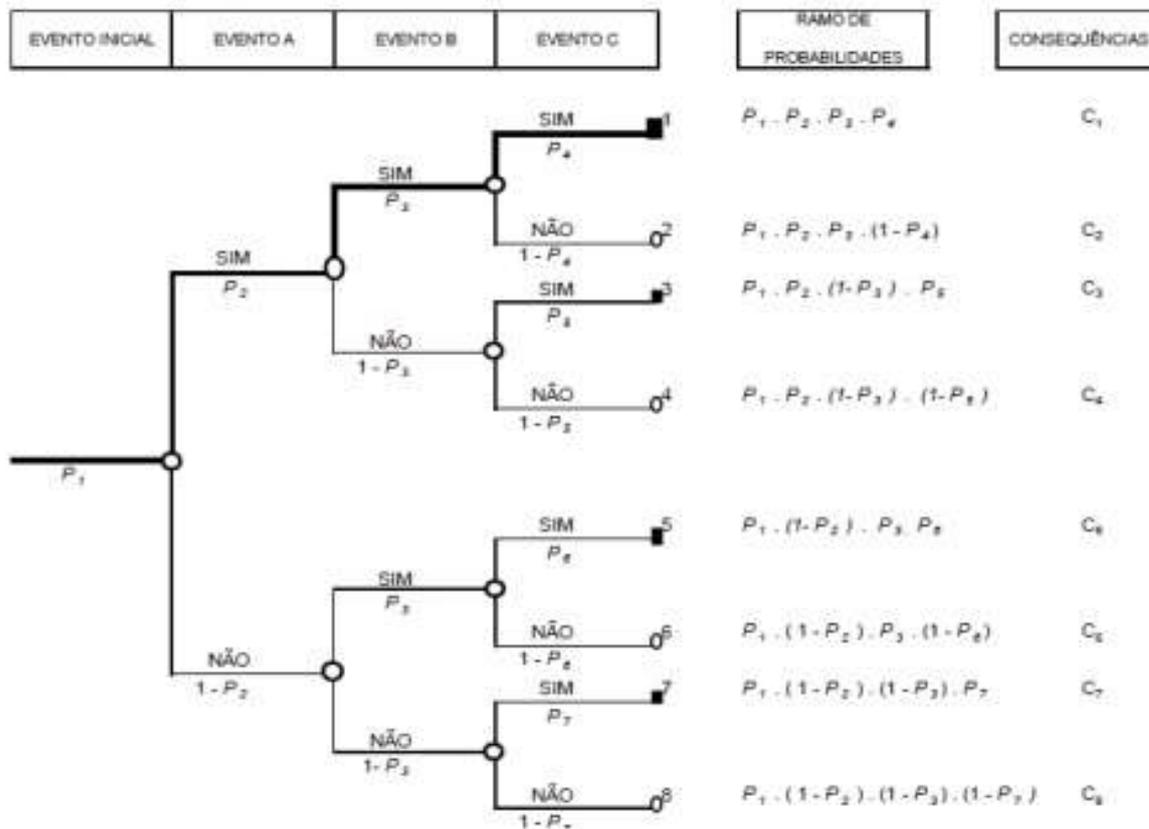
Um dos pressupostos é a necessidade de se identificarem os subsistemas que compõem os ramos, mas que não têm dependência, enquanto dentro dos ramos, é necessário identificar a sequência lógica entre os eventos até a possível ocorrência da falha em cada ramo (LADEIRA, 2007).

Hartford e Baecher (2004), ressaltam que a falta de base teórica pode significar que as construções (das árvores) sejam difíceis, se não impossíveis, para alguns modos de falha, de serem desenvolvidas corretamente no tempo presente. Todavia, isso não quer dizer que a ETA não seja útil para avaliação de risco em barragens, mesmo porque fornecem uma estrutura altamente intuitiva, além do que os demais métodos também estão sujeitos, se não mais, à falta de uma base teórica rigorosa.

A ETA é utilizada, em última análise, para embasar processos de decisão, explicando como uma barragem pode se comportar. Ela adiciona considerações que no passado não eram ponderadas formalmente: as probabilidades associadas a vários modelos de comportamento e suas consequências para a barragem e para o vale a jusante, que podem ser avaliadas à medida que o fenômeno ocorre (HARTFORD; BAECHER, 2004; VIANNA, 2015).

A Figura 5 apresenta um exemplo de ETA aplicado na prática.

Figura 5. Características das Árvores de Eventos.



Fonte: Ladeira (2007)

As árvores de eventos são uma ferramenta de diagnóstico; elas não têm a intenção de gerar números por si só, mas de fazer inferências sobre como uma barragem pode se comportar quando sujeita às condições de operação.

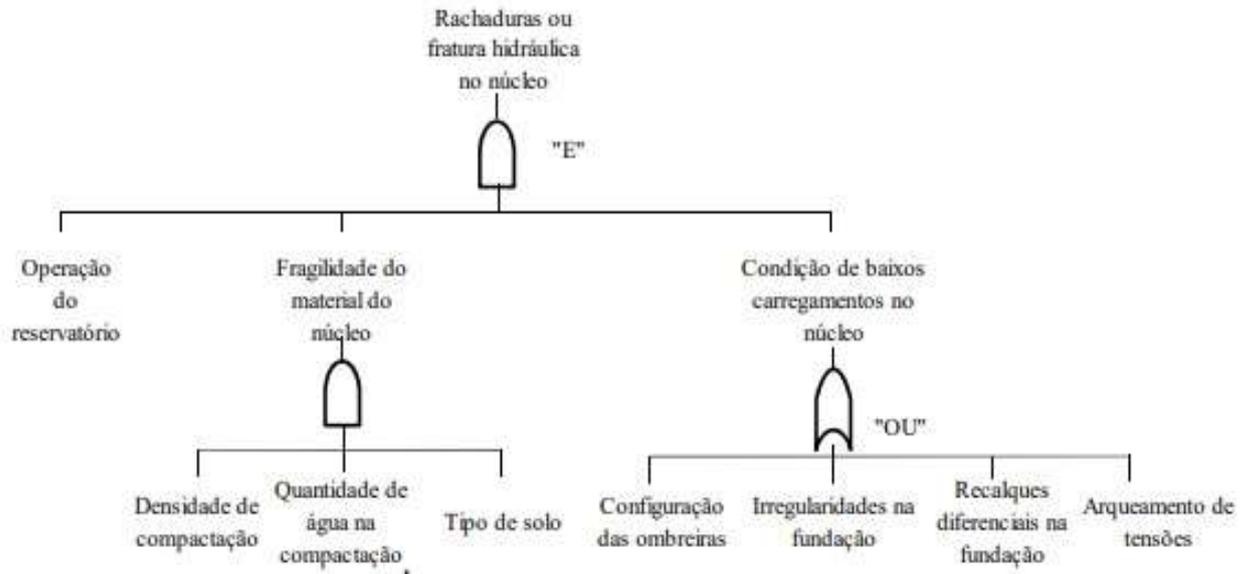
3.5.1.3 Análise Árvore por Falhas (FTA – Fault Tree Analysis)

Na tentativa de avaliar a probabilidade de ocorrência de fenômenos de difícil modelagem, podem ser aplicadas as Árvores de Falhas (*Fault Tree Analysis*– FTA). O método consiste em se estabelecer hipoteticamente a falha no sistema, identificando combinações possíveis de gerar a falha superior, ou evento de topo. Este método é baseado no raciocínio indutivo ou de “trás para frente”, partindo da falha para as causas (SOUZA et al., 2017).

De acordo com Pimenta (2009), as árvores de falhas (Figura 6), são análises do tipo qualitativas, podendo ter ainda o uso semi-quantitativo, ou mesmo quantitativo,

dependendo a forma de estimativa das probabilidades. Ao contrário da ETA, trata-se de um método gráfico indutivo, que, a partir de uma determinada falha, procura identificar todas as sequências que conduzem à sua materialização. Por isso, são largamente empregadas em estudos pós-ruptura.

Figura 6. Exemplo de Árvore de Falha (FTA).



Fonte: Perini (2009)

A representação gráfica, e lógica, dos modos de ocorrência do evento de topo em análise é, em geral, de fácil leitura e compreensão. Souza et al. (2017) relatam que como as árvores de eventos são um método mais intuitivo, empregam-se, comumente, as árvores de falhas conjuntamente com as árvores de eventos.

3.5.1.4 Análise de Perigo e Operacionalidade (Método HAZOP)

O Método HAZOP é uma ferramenta de análise de riscos qualitativa que tem como característica principal ser realizado com a participação de um time multidisciplinar, sob a condução de um líder, examinando todas as p sistema (conjunto de estruturas) objetivos de projeto utilizando um conjunto de palavras analisado, sendo discutidas e registradas suas causas, consequências ao risco correspondente (SOUZA et al., 2017).

O método classifica por meio de palavras os desvios das grandezas que caracterizam o comportamento de um subsistema em análise, reconhecendo as causas e as consequências dos desvios e propondo ações corretivas (COLLE, 2008).

O método HAZOP permite uma análise estruturada, lógica e minuciosa do sistema, ampliando o conhecimento e a confiabilidade sobre o mesmo. Esse método é muito empregado na indústria, e em especial nas fases de projeto e construção, tendo como maior vantagem permitir alterações de concepção e de métodos construtivos, de forma a reduzir o risco, empregando “*Defense Design*” (defesas de projeto), sistemas de bloqueio e/ou instrumentos para detectar ou prover alarme (SOUZA et al., 2017).

O Quadro 2 apresenta um exemplo do Método HAZOP.

Quadro 2. Exemplo ilustrativo de aplicação do método HAZOP.

Sistema principal Barragem (3)
 Sub-sistema Ensecadeira (2)
 Fase Construção (1)

Código de identificação	Designação	Grandeza	Desvio (palavra chave)	Causa	Efeitos	Meios			Meios adicionais
						de detecção do desvio	de prevenção do desvio	de mitigação dos efeitos	
3-2-1 (a-b-c)	Ensecadeira	Assentamento	MUITO SUPERIOR (ao valor estimado)	Colapso dos materiais do maciço estabilizador de montante	. Abertura de fendas . Estabelecimento de caminhos de percolação montante/jusante . Erosão interna . Formação de brecha . Libertação de uma onda de cheia para jusante	Marcas de nivelamento para medição dos assentamentos Inspeção visual	Ensaio de caracterização Colocação e compactação dos materiais do maciço estabilizador de montante do lado húmido	Subida expedita do coroamento da ensecadeira Accionamento do Plano de Emergência	Mais do que um meio de comunicação entre a obra e o exterior Sistema de aviso e alerta

a - Sistemas principais

- 1 - bacia hidrográfica
- 2 - albufeira
- 3 - barragem
- 4 - vale a jusante

b - Sub-sistemas da barragem

- 1 - galeria de desvio provisório
- 2 - ensecadeira
- 3 - corpo da barragem
- 4 - descarregador de cheias
- 5 - descarga de fundo
- 6 - tomada de água

c - Fase

- 1 - construção
- 2 - 1ª enchimento
- 3 - exploração (primeiros 5 anos)
- 4 - exploração (após os primeiros 5 anos)

3.5.1.5 Análise dos modos de falha potenciais (Potencial Failure Modes Analysis – PFMA)

A análise dos modos de falha potenciais, como estruturado pelo USBR (*Bureau of Reclamation*), USACE (*U.S. Army Corps of Engineers*) e exigido pelo FERC (*Federal Energy Regulatory Commission*) é um trabalho completo de identificação, descrição e rastreio dos modos de falha de uma estrutura, que permite o entendimento e avaliação de riscos, bem como a identificação de possíveis ações de redução de risco e de informações adicionais que seriam úteis para uma melhor definição do caso em estudo (PERINI, 2009).

O PFMA tem início com a identificação dos possíveis modos de falha com a participação de um grupo diversificado de pessoas qualificadas. Após uma listagem inicial de possíveis modos de falha, são excluídos aqueles que não se espera que contribuam significativamente para o risco associado a barragem. Os motivos pormenorizados das exclusões devem ser claramente documentados e apenas os riscos mais significativos passarão para as próximas etapas de análise (SOUZA et al., 2017).

A análise prossegue com a verificação do comportamento da estrutura em diversas condições de carregamento (BAECHER; CHRISTIAN, 2003) – seja sob carga estática, nível de água operacional normal, níveis de água excepcionais, sismo ou qualquer outro carregamento externo que possa dar início à sequência de ruptura – e requer a descrição da sequência completa do mecanismo de falha potencial, conforme apresenta a Figura 7.

Figura 7. Etapas de Descrição do Modo Potencial de Falha (PFMA).



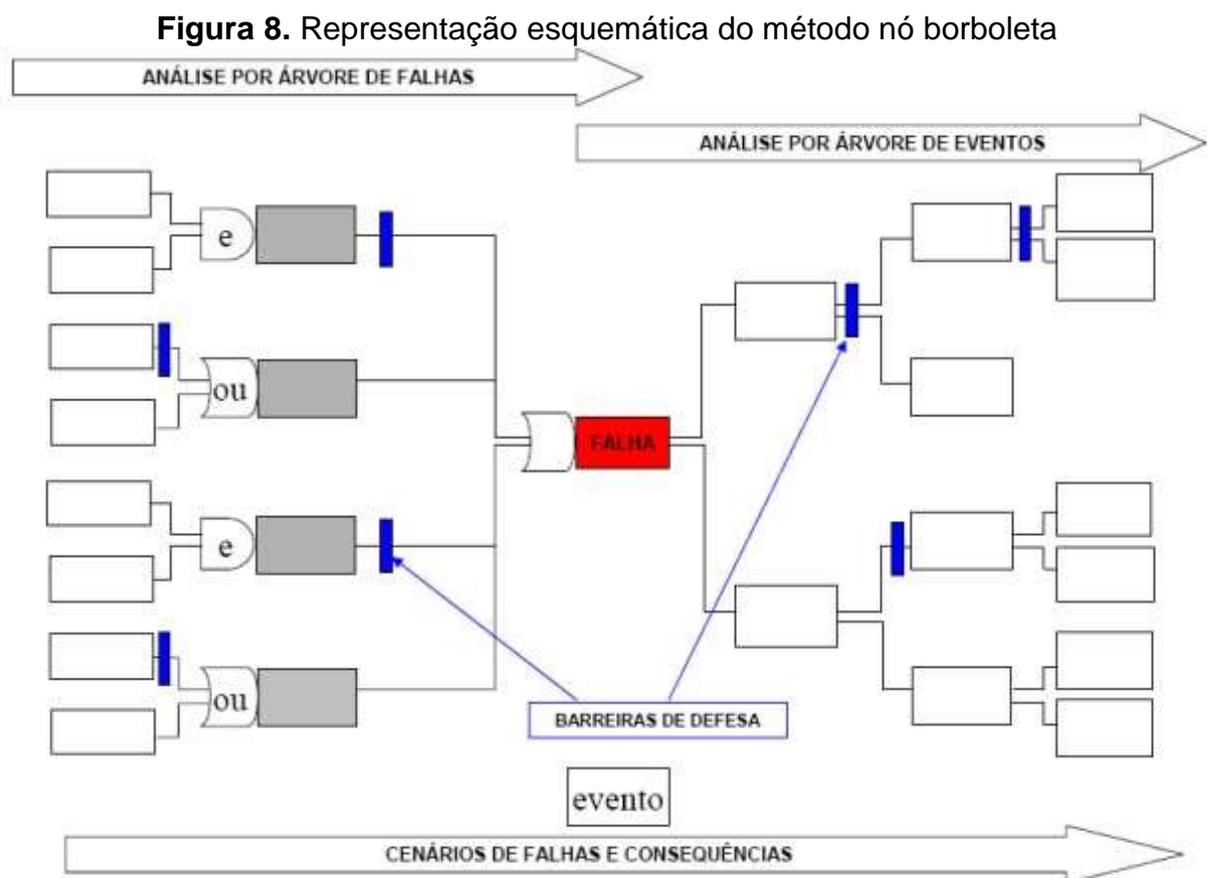
Fonte: Souza et al. (2017).

A avaliação das consequências é realizada em duas etapas. A primeira avalia os impactos a jusante para determinado modo de falha potencial e a segunda o quanto rapidamente ele pode progredir, se é mais provável a ruptura parcial ou total, ou outros atributos específicos do local (PERINI, 2009).

Como vantagens do PFMA, Souza et al. (2017) citam: o entendimento detalhado de cada modo de falha potencial; garantia de que a equipe tenha um entendimento comum para discussões e tomadas de decisão subsequentes; a garantia do registro completo das informações de forma que, no futuro, as decisões tomadas anteriormente possam ser compreendidas, e; o fornecimento de bases e informações sólidas que permitam a quantificação dos riscos de forma semi-quantitativa e constituir inputs para análises quantitativas caso se julgue necessário.

3.5.1.6 Método Noed Papillon (Nó Borboleta)

O evento central (Figura 8) representa a falha do sistema unindo a parte esquerda, que utiliza o método da Árvore de Falhas, à parte direita, que utiliza Árvore de Eventos.



Fonte: Colle (2008)

4. CONCLUSÃO

A experiência da área de segurança de barragens em processos de análise e avaliação de riscos ainda pode ser considerada limitada, mesmo nos países que já fazem uso da metodologia há bastante tempo.

Já é reconhecido que atender aos padrões ditados pelas normas técnicas de projeto nem sempre é suficiente para alcançar o nível de risco desejável e que as análises de risco podem colaborar de forma importante no projeto, construção e operação de barragens.

Alguns benefícios das análises de riscos já são bastante conhecidos, tais como, a identificação sistemática dos modos de falha potenciais e melhor entendimento do desempenho das estruturas, a definição de áreas com insuficiência de dados ou informações, a integração das várias áreas disciplinares envolvidas e o estabelecimento de bases para identificação de medidas de redução de risco adequadas (respostas aos riscos) e sua priorização.

Pode-se destacar que uma análise de risco melhora consideravelmente a compreensão da segurança da barragem por meio da análise da lógica dos mecanismos de falha. Assim, o benefício real da análise não é apenas o resultado numérico, que geralmente tem grande incerteza, mas o processo em si.

Ainda existe uma grande dificuldade em incorporar as análises de risco aos processos de gerenciamento de segurança de barragens. Realizar análises de riscos sem um objetivo específico, empregando métodos inadequados e deixando os resultados registrados apenas nos relatórios de análise pode consumir recursos sem o retorno esperado.

É importante que os ganhos de conhecimento advindos das análises possam ser contabilizados por todos os envolvidos na gestão da barragem e que os riscos identificados sejam gerenciados com base nos estudos realizados. Ganhos efetivos só serão obtidos se as análises de riscos forem efetivamente incorporadas nas estratégias de monitoramento, tomadas de decisões quanto a respostas aos riscos, priorização de estudos e obras, e comunicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Adiel Teixeira de: O conhecimento e o uso de métodos multicritério de apoio a decisão. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2011.

ANA. Agência Nacional de Águas. Ministério do Meio Ambiente. Relatório de segurança de barragens 2017. Brasília: ANA, 2018. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/noticias/45-barragens-preocupam-orgaos-fiscalizadores-aponta-relatorio-de-seguranca-de-barragens-elaborado-pela-ana/rsb-2017.pdf/view>>. Acesso em: 20 out. 2020.

ANDERÁOS, Alexandre M. N.; Lígia ARAÚJO; Carlos M. NUNES: Classificação de barragem quanto à categoria de risco e ao dano potencial associado - um exercício. Em Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 10, Bento Gonçalves -RS, 2013.

ASSAF NETO, Alexandre: Mercado financeiro. São Paulo: Atlas, 2001.

BAIMA, S. K. de O. Uma Metodologia multicritério construtivista para a avaliação da vulnerabilidade de barragens e regiões a jusante. Tese de Doutorado, Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

BERNSTEIN, P. L. Desafio aos deuses: a fascinante história do risco. Tradução de Ivo Korytowski. Rio de Janeiro: Campus, 1997.

BIEDERMANN, R. Safety Concept for Dams: Development of the Swiss concept since 1980. Wasser, Energie, Luft, 89: 55-72, 1997.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Recursos Hídricos. Conselho Nacional de: Resolução nº 143/2012. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art. 7º da lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Diário oficial da união, Brasília, DF, 4 de set.2012, seção 1. Disponível em: <https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7231>. Acesso em: 25 ago. 2020.

CALDEIRA, L. Análises de riscos em geotecnia. Aplicação a barragens de aterro. Lisboa: LNEC, 2005. 266 p.

CALIL, L. F. P. et. al. Metodologia para gerenciamento de risco: foco na segurança e na continuidade. Tese de Mestrado, Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2009.

CNPGB. Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens. Grupo de Trabalho de Análise de Riscos em Barragens. 1º Relatório de Progresso. jan. 2005, Portugal, 13 p. Disponível em: < <https://cnpgeb.apambiente.pt/imagens/relProgJaneiro05.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2020.

COLLE, G. A. Metodologias de análise de risco para classificação de barragens segundo a segurança. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba/PR. 2008.

DIAS, G.G. Proposta de metodologia de avaliação qualitativa da segurança de barragens com base no risco. Dissertação de Mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG. 2010.

FONSECA, Alessandra da Rocha. Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica-estudo de caso das barragens da uhe são simão. Tese de Mestrado, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2003.

FOSTER, M.; SPANNAGLE, M.; FELL. Report on the Analysis of Embankment Dam Incidents. The University of South Wales, 1998.

FUSARO, T. C.; DIAS, G. G. Módulo III: gestão e desempenho de barragens. Unidade 1: análise e gestão de riscos. Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI. 2011. Disponível em: <<https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerc/handle/ana/2179>>. Acesso em: 20 out. 2020.

HARTFORD, D.N.D. Emerging principles and practices in dam risk management. In: proceedings of the international workshop on risk analysis in dam safety assessment, 1999, Taipei, Taiwan. Risk Analysis in dam safety assessment. Taiwan: Water Resources Publications, LLC, 1999. p. 1-34.

HARTFORD, D.N.D.; BAECHER, G.B. Risk and Uncertainty in Dam Safety. CEA Technologies Dam Safety Interest Group. Thomas Telford Ltd., London. 2004.

ICOLD. CIGB: Risk assessment in dam safety management: A reconnaissance of benefits, methods and current applications. Paris: ICOLD, 2005.

INERIS. Institut National de L'Environnement Industriel et des Risques. Outils d'analyse des risques générés par une installation industrielle. Direction des Risques Accidentels. 2003.

LADEIRA, J. E. R. Avaliação de segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por métodos probabilísticos: o caso UHE - São Simão. 2007. 210 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

LEITE, Sérgio Ribeiro Modelo para Avaliação de Riscos em Segurança de Barragens com Associação de Métodos de Análise de Decisão Multicritério e Conjuntos Fuzzy. Dissertação (Mestrado - Mestrado Profissional em Computação Aplicada) -- Universidade de Brasília, 2019.

MELO, Alexandre Vaz de: Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: estudo de caso de barragens da CEMIG GT. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

PARDO, J. A. R. Metodologia para análise e gestão de riscos em projetos de pavimentos ferroviários. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Ouro Preto/MG, 2009.

PERINI, Daniel Sosti: Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra. Tese de Mestrado, Dissertação (Mestrado em Geotecnia)- Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2009.

PETRONILHO, M. R. Avaliação do comportamento geotécnico de pilhas de estéril por meio de análises de risco. 2010. 137 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

PIASENTIN, Corrado: Considerações sobre a importância das observações visuais na auscultação de barragens. Em Seminário Nacional de Grandes Barragens, 15, Salvador, 2003.

PIASENTIN, Corrado: Um índice para avaliação do nível de auscultação de barragens. Em SEMINÁRIO NACIONAL DE BARRAGENS, 26., 2005, Goiânia. Anais eletrônicos. Goiânia, 2005.

PIMENTA, Lurdes. Abordagens de riscos em barragens de aterro. Lisboa: LNEC, 2009.

PINTO, A. Veiga. Gestão de Riscos e Segurança de Barragens. In: 3º Simpósio de Segurança de Barragens e Riscos Associados. Salvador: Comitê Brasileiro de Barragens, novembro de 2008.

SALMON, G. M.; HARTFORD, D. N. D. Risk analysis for dam safety. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, v. 6, n. 32, p. 42-47, 1995.

SOUZA, T. C.; CAMPELLO, I. C.; LIMA, L. M. K.; FUSARO, T. C. Métodos de análise de risco: aplicabilidade e limitações no gerenciamento de riscos associados a barragens. Anais... II Seminário De Gestão De Riscos E Segurança De Barragens De Rejeitos – SGBR. Belo Horizonte – MG, 15 e 16 de maio de 2017. Disponível em: <file:///C:/Users/Ana%20Carla/Downloads/T.2-A.13.pdf>. Acesso em: 22 out. 2020.

USBR. United States Department of the Interior. Guidelines for achieving public protection in dam safety decisionmaking. United States Department of the Interior. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado: 15 June 2003b, 19 p. Disponível em: < https://www.usbr.gov/ssle/dam_safety/risk/references.html>. Acesso em: 20 out. 2020.

VAUGHAN, Emmett J.; Therese VAUGHAN: Fundamentals of risk and insurance. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.

VIANNA, Luiz Filipe Venturi. Metodologias de análise de risco aplicadas em planos de ação de emergência de barragens [manuscrito]: auxílio ao processo de tomada de decisão. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte. 2015.

VIEIRA, Vicente P. P. B. Notas de aula. Curso de Doutorado em Recursos Hídricos. Universidade Federal do Ceará, 2000.

VIEIRA, Vicente P. P. B. Análise de Risco em Recursos Hídricos: Fundamentos e Aplicações. Porto Alegre: ABRH, 2005.

ZUFFO, M. S. R. Metodologia para avaliação da segurança de barragens. Dissertação (mestrado). Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas –Unicamp. Campinas/SP. 2005.