

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/79

Metodologias de Análise de Riscos: Análise Comparativa e Associativa entre FMEA, Bow Tie, Árvore de Eventos e Falhas

Ana Caroline Águido

Engenheira Ambiental, GWS Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, ana.aguido@gwsengenharia.com.br

Lucas Brasil

Engenheiro Civil, GWS Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, lucas.brasil@gwsengenharia.com.br

Mariana Costa

Engenheira Civil, GWS Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, mariana.costa@gwsengenharia.com.br

Robert Nagai

Engenheiro Civil, GWS Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, robert.nagai@gwsengenharia.com.br

Henrique Nogueira

Engenheiro Civil, GWS Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, henrique.nogueira@gwsengenharia.com.br

RESUMO: A Resolução nº 95/2022, complementada pela resolução nº 130/2023, ambas publicadas pela Agência Nacional de Mineração (ANM), estabelece a necessidade de implantação do Processo de Gestão de Riscos para Barragens de Mineração (PGRBM) para barragens classificadas com Dano Potencial Associado (DPA) Alto. No PGRBM deverá conter a identificação, análise, avaliação e classificação dos riscos em Aceitável, ALARP (Tão Baixo como Razoavelmente Exequível) e Inaceitável a partir da utilização de metodologias reconhecidas nacionalmente e internacionalmente. Nesse contexto, serão discutidas três metodologias que podem ser utilizadas para análise de riscos geotécnicos e hidrotécnicos, sendo elas o FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), em português “Análise de Modos de Falha e seus Efeitos”, *Bow Tie* e Árvore de Eventos associada à Árvore de Falhas. Essas metodologias podem ser aplicadas de forma isolada ou, até mesmo, podem ser realizadas análises complementares com o auxílio de mais de uma metodologia. A análise FMEA pode ser complementada com a aplicação da Árvore de Eventos, a fim de qualificar numericamente a probabilidade de ocorrência de determinada causa. Ao passo que a análise *Bow Tie* pode ser realizada, de maneira adicional, para melhor qualificar os controles preventivos e mitigatórios existentes. Sendo assim, cada metodologia poderá ser aplicada em diferentes contextos e espaços temporais, a depender do objetivo de cada análise de risco. No presente artigo será realizada uma breve descrição das metodologias. Adicionalmente, é apresentada uma análise comparativa entre as três metodologias de análise de risco citadas, explorando as vantagens e desvantagens observadas para a qualificação de riscos geotécnicos e hidrotécnicos no contexto da mineração.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de Risco, FMEA, *Bow Tie*, Árvore de Eventos, Árvore de Falhas.

ABSTRACT: Resolution No. 95/2022, complemented by Resolution No. 130/2023, both published by the National Mining Agency (ANM), establishes the need to implement the Risk Management Process for Mining Dams (PGRBM) for dams classified as Potential Damage Associate (DPA) High. The PGRBM must contain the identification, analysis, evaluation and classification of risks into acceptable, ALARP (As Low as Reasonably Achievable) and unacceptable based on the use of nationally and internationally recognized methodologies. In this context, three methodologies that can be used to analyze geotechnical and hydrotechnical risks will be discussed, namely FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), in Portuguese “Failure Mode Analysis and their Effects”, Bow Tie and Tree of Events associated with the Fault Tree. These methodologies can be applied in isolation or even complementary analyzes can be carried out with the help of more than one methodology. The FMEA analysis can be complemented with the application of the Event Tree, in order to numerically qualify the probability of occurrence of a given cause. While the Bow Tie analysis can be carried out, in an additional way, to better qualify existing preventive and mitigating controls. Therefore,

each methodology can be applied in different contexts and time frames, depending on the objective of each risk analysis. This article will provide a brief description of the methodologies. Additionally, a comparative analysis is presented between the three risk analysis methodologies mentioned, exploring the advantages and disadvantages observed for the qualification of geotechnical and hydrotechnical risks in the context of mining.

KEYWORDS: Risk Analysis, FMEA, Bow Tie, Event Tree, Fault Tree.

1 INTRODUÇÃO

A gestão de riscos é uma ferramenta fundamental que pode ser empregada nas ações de prevenção da ocorrência de um evento indesejado, devendo ser eficaz na predição e sempre atualizada de acordo com as análises e cenários avaliados. De acordo Ladeira (2007) *apud* Gomes *et al.* (2005), o processo de avaliação do risco deve ser iniciado com o estudo dos modos de falhas para estimar as probabilidades e consequências associadas a cada uma das ameaças identificadas.

A implementação de análises de riscos é indicada pelo Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos – GISTM (ICMM, 2020), bem como no Processo de Gestão de Riscos para Barragens de Mineração (PGRBM), implementado pela Resolução ANM n° 95/2022 (promulgada pela Resolução ANM n° 130/2023), sendo obrigatório para barragens de mineração que possuem Dano Potencial Associado (DPA) Alto.

De acordo com Melo (2014), as análises de riscos podem ser de natureza qualitativa, quantitativa e semiquantitativa. Nas análises qualitativas, é possível utilizar uma abordagem descritiva ou uma escala numérica para demonstrar a probabilidade de ocorrência de danos e a magnitude de suas potenciais consequências. Nas análises quantitativas, são utilizados valores numéricos para representar as consequências potenciais e suas probabilidades, permitindo observar a magnitude real das consequências no cenário em estudo com base nos dados apresentados. Já as análises semiquantitativas, também denominada como análise intermediária, considera-se uma abordagem conjunta (qualitativa e quantitativa), onde geralmente são empregados descritores verbais para traduzir valores de probabilidades atribuídas em valores numéricos.

Nesse contexto, serão apresentadas três metodologias que podem ser utilizadas para análise de riscos geotécnicos e hidrotécnicos, sendo elas o FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), em português “Análise de Modos de Falha e seus Efeitos”, *Bow Tie* e Árvore de Eventos associada à Árvore de Falhas. Cada metodologia poder ser aplicada em diferentes contextos e espaços temporais, a depender do objetivo de cada análise de riscos.

No presente artigo será realizada uma análise comparativa entre as três metodologias de análise de risco citadas, explorando as principais vantagens e desvantagens, o que leva a indicações sobre a melhor aplicabilidade de cada método a depender do objetivo pretendido.

2 APLICABILIDADE DE ANÁLISE DE RISCOS

A elaboração de análise de riscos para estruturas geotécnicas, no contexto da mineração, está relacionada com a avaliação das condições de segurança das estruturas e do possível impacto de uma eventual ruptura hipotética a que o vale de jusante está sujeito e dos possíveis impactos sobre indivíduos, sociedade, órgãos reguladores e meio ambiente. Convém mencionar que o risco está presente em obras de engenharia já que, frequentemente, observa-se a dificuldade de se caracterizar e prever, com exatidão, o comportamento de certos materiais, associado às limitações, variações e incertezas das modelagens realizadas.

O processo de gerenciamento de riscos deve ser conduzido de forma sistemática, iterativa e colaborativa. Dessa forma, este processo consiste na identificação do que pode falhar, por quais razões, de que forma e, ainda, na determinação de possíveis causas com potencial para desencadear acontecimentos capazes de conduzir a incidentes e acidentes. De acordo com o ICOLD (2011), o risco pode ser definido como a possibilidade de acontecer algo, podendo ser definido como o produto da probabilidade pela consequência.

Hartford e Baecher (2004) afirmam que as análises de risco são úteis para a operação, a manutenção e a vigilância das barragens e reservatórios. Conforme apresentado por Melo (2014), salienta-se que a gestão de riscos associados a barragens pode ser considerada um grande avanço, em especial nas fases de operação e manutenção, por consistir nas bases de um programa estruturado de monitoramento e priorização das atividades de reparo e reabilitação dessas estruturas por parte dos empreendedores. Além disso, muitas vezes as decisões relativas à alocação de recursos de manutenção são tomadas pelos proprietários de barragens em

um ambiente não técnico, e a abordagem de risco é amplamente difundida e geralmente de fácil entendimento e aceitação pelos tomadores de decisão.

No processo de gestão de riscos, uma das etapas de grande relevância está associada a identificação dos potenciais mecanismos de falha da estrutura, tendo como enfoque a definição dos modos de falha críveis para as estruturas em análise.

A Figura 1 apresenta as etapas previstas na gestão de riscos em consonância com a NBR 31.000/2018 (“Gestão de riscos – Diretrizes”). De acordo com a referida norma, no processo de Gestão de Riscos as seguintes etapas devem ser consideradas: Estabelecimento do Contexto; Identificação de Riscos; Análise de Riscos; Avaliação de Riscos; Tratamento de Riscos; Monitoramento e Análise Crítica; Comunicação e Consulta.

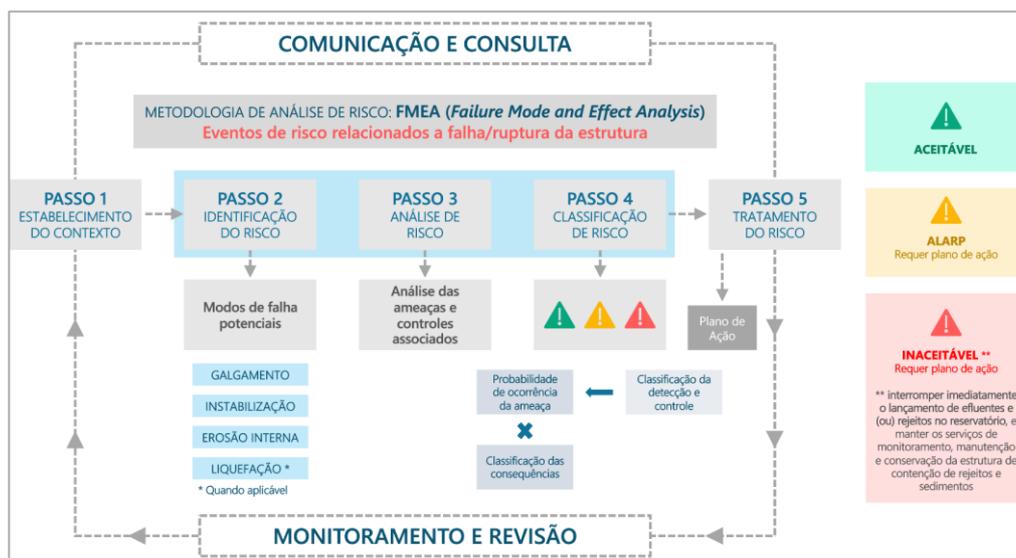


Figura 1. Etapas da Gestão de Riscos. Fonte: Adaptado da NBR 31.000/2018.

3 METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE RISCO

3.1 FMEA

A metodologia FMEA (do inglês *Failure Modes and Effects Analysis*) é uma ferramenta que permite a identificação e análise qualitativa de riscos associados a uma determinada falha, sendo realizada com base na identificação do risco de falhas e de suas consequências.

Esta metodologia possibilita o julgamento sistêmico para assegurar que todos os modos de falha possíveis e seus efeitos (consequências) sejam analisados. Além disso, possibilita a detecção do risco por meio dos controles em diferentes estágios de evolução do modo de falha (primeiro estágio, segundo estágio e estágio final). Em linhas gerais, a metodologia FMEA pode ser desenvolvida na seguinte sequência:

1. Levantamento e integração de todas as informações e estudos relevantes à construção e operação da estrutura (projeto, investigações, incidentes e acidentes ocorridos);
2. Definição do estágio do projeto avaliado: conceitual, básico, operação, descaracterização ou fechamento;
3. Os modos de falha identificados na estrutura em análise podem ser originados da ocorrência de: fenômenos naturais, processo físico ou biológico, deficiências na fase de construção, defeitos na qualidade dos materiais de construção, falhas operacionais, ação humana, entre outras;
4. Identificação dos efeitos de cada modo de falha sobre a estrutura, sobre o sistema em que está inserido e sobre o ecossistema em seu entorno;
5. Análise dos efeitos do modo de falha e capacidade de detecção dos controles com relação ao estágio de: impactos locais (primeiro estágio); impactos intermediários (segundo estágio) e impactos finais (estágio final);
6. Classificação dos controles de acordo com a eficácia;
7. Avaliação da probabilidade de ocorrência do evento;

8. Classificação das consequências/impacto de cada modo de falha de acordo com grau de severidade;
9. Elaboração da matriz de risco (podendo ser 6x6 ou 5x5, por exemplo) com a avaliação qualitativa da possibilidade de ocorrência *versus* a severidade das consequências/impactos do evento. A partir desta matriz, é estabelecida uma classificação de riscos em: Risco Aceitável, ALARP e Risco Inaceitável. A sigla ALARP, traduzida do inglês “*As low as reasonably practicable*”, em português "tão baixo como razoavelmente exequível", representa a situação em que os esforços para a redução do risco devem ser contínuos até que o sacrifício adicional (em termos de custo-benefício, viabilidade técnica, tempo, esforço ou outro emprego de recursos) seja amplamente desproporcional à redução de risco adicional alcançado (Art. 2 - Resolução Nº. 95/2022, ANM);
10. Definição de controle e ações mitigadoras (podendo ser denominados de planos de ação) de maneira a diminuir a possibilidade dos modos de falha bem como de seus efeitos e severidade.

Para a análise FMEA é importante que seja definido para qual cenário está se avaliando a condição da estrutura geotécnica. De acordo com Lauriano (2009), é uma das metodologias mais utilizadas no Brasil, principalmente em barragens de rejeitos.

3.2 BOW TIE

A metodologia *Bow Tie* é uma abordagem centrada no evento crítico (ou evento topo), que inclui um diagrama de risco mostrando como várias ameaças podem resultar na perda de controle de um perigo e permitir que essa condição insegura se desenvolva em várias consequências indesejadas. Esta metodologia permite identificar os perigos e avaliar os riscos associados com uma visão geral clarificada dos cenários de acidentes, assim como a identificação de causa e efeito, tendo como ponto central o acontecimento crítico.

Dentre as vantagens da utilização do *Bow Tie* tem-se: o mapeamento de processos críticos; o mapeamento de atividades críticas e dos vários controles preventivos e mitigatórios para cada ameaça (barreiras); o levantamento e análise completa dos fatores de riscos, riscos e impactos; a estrutura lógica e de fácil entendimento, propiciando uma visão clara e objetiva dos principais riscos da organização; a larga abordagem, ou seja, pode ser utilizado para diversas disciplinas (Meio ambiente, Projetos, Financeiro, entre outros) e a investigação de ocorrências materiais, danos a pessoas e danos ambientais.

O diagrama, apresentado na Figura 2, apresenta o esquema das barreiras e controles de prevenção e mitigação existentes, as causas e consequências.



Figura 2. Diagrama da Metodologia *Bow Tie*. Adaptado de Santos (2023).

3.3 ÁRVORE DE EVENTOS ASSOCIADA À ÁRVORE DE FALHAS

A Árvore de Eventos (*Event Tree Analysis* - ETA) é uma técnica gráfica que apresenta uma sequência lógica utilizada para identificar possíveis resultados dada a ocorrência de um evento inicial, podendo ser aplicada tanto qualitativamente como quantitativamente. Nas sequências, em cada nó são representadas as ramificações, em que cada evento terá uma resposta “sim” ou “não”, com sua probabilidade de ocorrência atribuída.

A Árvore de Falhas (*Fault Tree Analysis* – FTA) é uma técnica dedutiva utilizada para identificar e analisar os fatores que podem contribuir para um evento específico indesejado (chamado “evento de topo”), de maneira qualitativa ou quantitativa. Segundo Lima *et al* (2013) a análise da árvore de falhas pode ser qualitativa, quando se quer identificar as vulnerabilidades de um sistema ou individualizar os modos de falhas mais sensíveis, ou quantitativa, quando se quer avaliar a probabilidade de ocorrência de um evento indesejável e estimar a confiabilidade geral do sistema. O processo é iniciado com as consequências (ex: rupturas), tipicamente no topo do diagrama (evento topo), e progride em direção a um maior detalhamento das causas, localizadas na parte inferior do diagrama, de forma vertical. Além do evento topo, tem-se ainda os eventos primários, que não sofrem qualquer desenvolvimento na análise, ou seja, são assumidos independentes dos outros eventos e, se a análise em questão for quantitativa, a eles devem ser atribuídas probabilidades. Há também eventos intermediários, básicos (que não carecem maior desenvolvimento), condicionais (condições específicas ou restrições), entre outros (Lima *et al*, 2013).

Entre os eventos da FTA existem relações denominadas portas lógicas, em que a Porta “OU” indica que o evento ocorre se pelo menos um evento anterior/inferior ocorrer, e a Porta “E”, em que o evento ocorre se todos os eventos anteriores/inferiores ocorrer. Para ambas as metodologias, ETA e FTA, podem ser utilizadas as fórmulas de cálculo de Probabilidade da Álgebra Booleana, apresentadas a seguir:

Para o operador lógico “E”, utiliza-se a Equação 1:

$$P = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_n \quad (1)$$

Para o operador lógico “OU”, utiliza-se a Equação 2:

$$P = 1 - [(1 - P_1) \times (1 - P_2) \times \dots \times (1 - P_n)] \quad (2)$$

A Figura 3 apresenta um modelo esquemático com a sequência lógica de uma árvore de eventos e a Figura 4 apresenta um modelo esquemático da árvore de falhas.

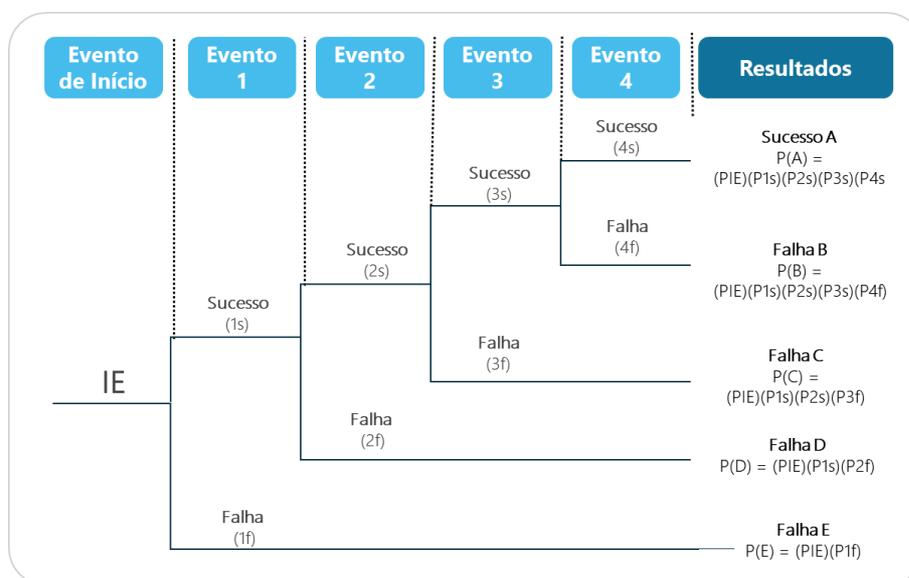


Figura 3. Modelo Esquemático da Metodologia Árvore de Eventos. Fonte: Adaptado de Hartford e Baecher (2004).

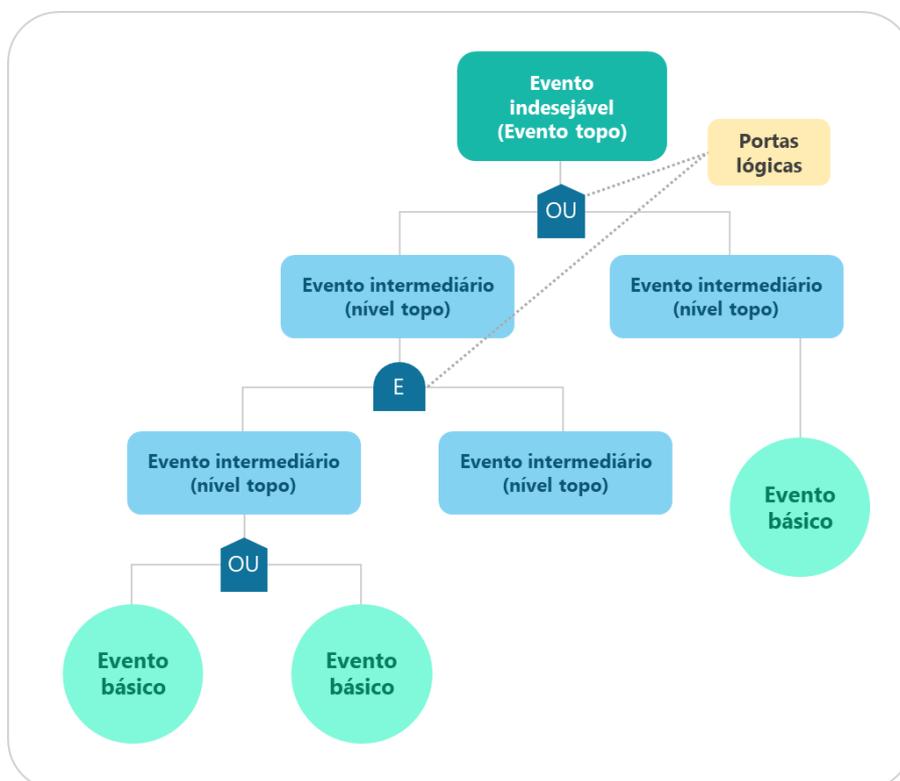


Figura 4. Modelo Esquemático da Metodologia Árvore de Falhas. Fonte: Adaptado de NASA (2002).

Destaca-se que, na metodologia Árvore de Eventos, a definição dos valores de probabilidade em cada nó pode ser realizada a partir de descritores verbais, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Probabilidade Equivalente para Descrição Verbal. Fonte: Baseada em Vick (1997), Lichtheim & Newman (1967) *apud* Baecher & Christian (2003).

Descrição Verbal	Probabilidade Equivalente
Virtualmente impossível	0,01
Pouco provável	0,15
Neutro (Não se tem informações sobre as chances de o evento ocorrer ou as chances de ocorrência são iguais)	0,50
Bastante provável	0,70
Mais provável	0,85
Virtualmente certo	0,99

4 ANÁLISE DAS METODOLOGIAS APRESENTADAS

No presente item, será apresentada uma análise comparativa das metodologias de análise de riscos mencionadas neste artigo, elencando aspectos relacionados à sua aplicabilidade, bem como vantagens e desvantagens, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Análise comparativa e aplicabilidade das metodologias de análise de riscos

Método	Tipo de Análise	Vantagens	Desvantagens
FMEA	Qualitativa	<ul style="list-style-type: none"> • Adequado para equipes multidisciplinares; • A discretização e avaliação dos modos de falha são realizadas de acordo com a possível materialização dos eventos, levando em consideração o contexto em que a estrutura está inserida e os controles existentes. A materialização do modo de falha não necessariamente aborda o evento final associado à ruptura (no caso de análises de risco para barragens de rejeitos, por exemplo); • Propicia boas discussões. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pode exigir um investimento significativo de tempo e recursos para conduzir uma análise detalhada. Subjetividade na definição das probabilidades e dificuldade em priorizar os riscos avaliados; • Dependente da experiência dos membros da equipe nomeada e da qualidade das informações disponíveis.
BOW TIE	Qualitativa	<ul style="list-style-type: none"> • Foco na avaliação dos controles existentes/barreiras, que possam prevenir a ocorrência do evento central (evento topo) ou mitigar suas consequências; • As causas e consequências adversas de um evento podem ser ilustradas em conjunto; • Estruturação lógica e de fácil entendimento, propiciando uma visão clara e objetiva dos riscos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nem sempre é adequado para todos os tipos de eventos adversos, podendo ser mais eficaz em cenários específicos - com um evento topo definido e único.
FTA e ETA	Qualitativa; Quantitativa	<ul style="list-style-type: none"> • Fornece uma representação visual das possíveis causas de um evento adverso, o que facilita a compreensão e a comunicação entre as partes interessadas. • Possibilita uma análise com maior nível de detalhe a partir da definição numérica da probabilidade associada a um determinado risco. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se aplicada em diversos modos de falha, pode ser difícil capturar e avaliar todas as interações entre as falhas potenciais, limitando a eficácia da análise.

5 CONCLUSÃO

Neste artigo, foram apresentadas metodologias de análises de riscos que podem ser aplicadas na avaliação e gestão de riscos geotécnicos e hidrotécnicos aplicados a barragens de mineração e pilhas de rejeito e/ou estéril. O processo de avaliação de riscos é de suma importância e aponta diretrizes para alcançar o menor nível de risco possível para fases diversas do contexto da estrutura em análise, seja na condição de projeto, operação, descaracterização ou fechamento.

Análises de riscos possibilitam a identificação sistemática de modos potenciais de falha críveis para as estruturas de análise, além de auxiliar na identificação de lacunas existentes no que diz respeito aos estudos e documentação disponíveis para a estrutura, visando estabelecer uma base sólida para tomada de decisão e definição de estratégia, além de priorizar medidas para redução e/ou mitigação dos riscos. Um dos produtos da análise de riscos está relacionado a definição de ações a serem aplicadas na operação e manutenção dos processos da estrutura geotécnica avaliada, com o intuito de reduzir a probabilidade dos possíveis riscos, bem como minimizar possíveis impactos resultantes da materialização de falha da estrutura geotécnica.

Como pontos de destaque das metodologias apresentadas, a metodologia FMEA possibilita mapear o estágio da evolução do modo de falha, sendo possível identificar em qual fase a materialização dos efeitos é mais provável (1º - Efeitos/Impactos Locais, 2º - Intermediários ou 3º - Finais), quais os efeitos associados e quais ações preventivas e corretivas podem ser tomadas. A metodologia *Bow Tie* fornece uma visão compacta

do modo de falha, associada a fácil compreensão dos cenários de eventos relevantes que podem se materializar em um determinado contexto, tendo como destaque o modelo mental baseado em controles (preventivos e mitigatórios). A Árvore de Falhas permite analisar a probabilidade de ocorrência das causas de um dado evento (de maneira quantitativa) e a Árvore de Eventos possibilita avaliar as consequências associadas à ocorrência deste evento. Essas metodologias podem ser aplicadas de forma isolada ou, até mesmo, podem ser realizadas análises complementares com o auxílio de mais de uma metodologia. A escolha da metodologia a ser aplicada requer análise crítica a respeito das ameaças que serão avaliadas e do objetivo da análise, permitindo melhor abordagem e síntese dos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Mineração (2022). *Resolução N° 95, de 7 de fevereiro de 2022*. MME - Ministério de Minas e Energia. Brasília.
- Agência Nacional de Mineração (2023). *Resolução N° 130, de 24 fevereiro de 2023*. MME - Ministério de Minas e Energia. Brasília.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). *NBR ISO 31000. Gestão de Riscos - Diretrizes*. Rio de Janeiro.
- Baecher, G.B., Christian, J.T. (2003). *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. West Sussex, England, 619 p.
- Hartford, D.N.D., Baecher G.B. (2004). *Risk and uncertainty in dam safety*. CEA Technologies Dam Safety Interest Group. ISBN 0 7277 3270 6, London, England, Thomas Telford Publishing, 391 p.
- ICMM, UN, PRI, (2020) – *Global Industry Standard on Tailings Management* – GISTM.
- ICOLD (2011). *Improving tailings dam safety: critical aspects of management, design, operation and closure*. International Commission on Large Dams. Paris, 180 p. (Bulletin, 139).
- Ladeira, J.E.R. (2007). *Avaliação de segurança em Barragem de Terra sob o cenário de Erosão Tubular regressiva, por métodos probabilísticos. O Caso UHE – São Simão*. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 210 p.
- Lauriano, A.W. (2009). *Estudo de ruptura da Barragem de Funil: comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS*. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 251f.
- Lima, F.N., Naghettini, M., Espósito, T. (2013). *Aplicação do Método da Árvore de Falhas (FTA) para Avaliação da Probabilidade de Falha das Comportas do Vertedouro de uma Barragem*. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul.
- Melo, A.V. (2014). *Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: estudo de caso de barragens da CEMIG GT*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 244 f.
- NASA (2002). *Fault Tree Handbook with Aerospace Applications*. Versão 1.1. Agosto. NASA Office of Safety and Mission Assurance. Washington, DC.
- Santos, C.H. *Nova NR 01 - Análise De Riscos Diagrama Bow Tie – Template*. Disponível em: <<https://hotmart.com/pt-br/marketplace/produtos/analise-de-riscos-diagrama-bow-tie-template-conforme-nr-01-iso-31000-2018/I57424665R>>. Acesso em: 21 mar. 2023.