

ALINE HOJRON RIBEIRO

**PRINCIPAIS FATORES DE RISCO E CRITÉRIOS DE
SEGURANÇA NAS OBRAS DE DESCARACTERIZAÇÃO
DE BARRAGENS DE MONTANTE EM MINAS GERAIS**

Artigo Científico apresentado ao Curso de Especialização; Programa de Pós-Graduação Em Segurança De Barragens: Aspectos Técnicos e Legais, Escola Politécnica; Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista

Orientador: Prof. Dr. José Baptista de Oliveira Júnior

Coorientador: Dr. David de Barros Galo

Belo Horizonte
2024

Uma análise dos principais fatores de risco e critérios de segurança nas obras de descaracterização de barragens de montante em Minas Gerais

Aline Hojron Ribeiro

Resumo

O trágico histórico de rompimentos de barragens de rejeitos alteadas a montante no Brasil, em especial no estado de Minas Gerais, reacendeu o debate sobre a descaracterização dessas estruturas. O presente estudo se propõe a apresentar os principais fatores de risco ao longo do planejamento e execução de obras de descaracterização de barragens, bem como estabelecer critérios de segurança baseados nas boas práticas de engenharia. Para isso, o estudo selecionou os projetos e relatório de obras de 8 (oito) barragens de rejeitos alteadas pelo método de montante no estado de Minas Gerais em diferentes estágios de descaracterização. Os dados foram separados em dois grupos de acordo com a fase que se encontra a descaracterização, sendo, :I) fase de projeto; e II) fase de obra. Foi feito um mapeamento dos principais fatores de risco e possíveis falhas contidas nos documentos, sendo apresentadas as formas de controle e mitigação propostas pelo empreendedor. Foram listadas 24 possíveis falhas associadas a obra de descaracterização das barragens. Sendo 7 (sete) falhas muito críticas, 6 falhas (seis) críticas, 5 moderadas e 6 leves. As falhas são relacionadas às instabilidades geotécnicas, hidráulicas, ambientais e de gestão. O estudo concluiu que a falta de um mapeamento geológico da região, investigações geológico-geotécnicas nas fundações é apontado como o ponto de maior insegurança na construção do projeto. Na etapa de obra, o estudo de abalo sísmico para adoção dos limites das vibrações de equipamentos e a adequação dos sistemas hidráulicos foram citados como fundamentais nas barragens que não possuem estabilidade garantida. Quanto ao monitoramento, evidenciou-se o aumento do número de instrumentos/equipamentos em todas as barragens analisadas. O controle ambiental foi apontado como insuficiente em 6 (seis) das barragens analisadas, de modo geral destacou-se baixo número de amostragens de qualidade da água e deficiência no controle de sedimentos.

Palavra-chave: Barragem, descaracterização de barragens, barragens de montante

Abstract

The tragic history of upstream tailings dam failures in Brazil, particularly in the state of Minas Gerais, has reignited the debate on the descharacterization of these structures. The present study aims to present the main risk factors during the planning and execution of dam descharacterization works, as well as to establish safety criteria based on good engineering practices. For this, the study selected the projects and reports of works from eight tailings dams raised by the upstream

method in the state of Minas Gerais at different stages of descharacterization. The data were separated into two groups according to the phase of the descharacterization: I) design phase; and II) construction phase. A mapping of the main risk factors and potential failures contained in the documents was carried out, presenting the forms of control and mitigation proposed by the developer. A total of 24 possible failures associated with the dam descharacterization works were listed, including 7 very critical failures, 6 critical failures, 5 moderate failures, and 6 minor failures. These failures are related to geotechnical, hydraulic, environmental, and management instabilities. The study concluded that the lack of geological mapping of the region and geotechnical-geological investigations in the foundations is identified as the point of greatest insecurity in the construction of the project. In the construction phase, the study of seismic shaking to adopt the limits of equipment vibrations and the adequacy of hydraulic systems were cited as essential in dams that do not have guaranteed stability. Regarding monitoring, an increase in the number of instruments/equipment in all the dams analyzed was evidenced. Environmental control was pointed out as insufficient in 6 of the dams analyzed, generally highlighting a low number of water quality samplings and a deficiency in sediment control.

Keywords: Dam, dam decharacterization

INTRODUÇÃO

A descharacterização de barragens tem sido discutida amplamente pelos governos ao longo do mundo. Os motivos para se iniciar uma descharacterização incluem a principalmente a redução do risco de ruptura de barragens, diminuição de custos de manutenção, aumento das exigências legais, barragens em estado de abandono entre outros. Todavia, a depender da estrutura a obra de descharacterização tende a ser mais criteriosa do que a da sua construção, o que torna essa alternativa um risco à segurança.

O trágico histórico de rompimentos de barragens de rejeitos alteadas a montante no Brasil, em especial no estado de Minas Gerais, reacendeu o debate sobre a descharacterização dessas estruturas. Em 2019, após o rompimento da barragem Córrego do Feijão em Brumadinho (25 de janeiro de 2019), foi instituída no estado de Minas Gerais a Política Estadual de Segurança de Barragens – PESB, por meio da Lei 23.291, de 25 de fevereiro 2019. A política, em seu art. 13, veda a concessão de licenças ambientais para operação ou ampliação de barragens que utilizem o método de alteamento a montante, e determinou a descharacterização dessas estruturas em um prazo de três anos.

Segundo o inventário de barragens da Fundação Estadual do Meio Ambiente – Feam e os registros encontrados na Agência Nacional de Mineração,

em 2020 foram registradas 54 barragens alteadas à montante em Minas Gerais, em 2024, passados cinco anos da lei, 16 barragens concluíram as obras de descaracterização. Observa-se que o processo de remoção de barragens tem sido controverso, levando anos de trabalho, planejamento, pesquisa, normatização, negociação e argumentação jurídica.

A descaracterização de uma barragem deve ser feita levando em consideração o histórico de comportamento da estrutura e com critérios de segurança preestabelecidos, uma vez que a execução de uma obra sem gestão pode comprometer a segurança da barragem. É neste contexto que se enquadra o objeto do estudo que se propõe a apresentar os principais fatores de risco ao longo do planejamento e execução de obras de descaracterização de barragem, bem como estabelecer critérios de segurança baseados nas boas práticas de engenharia.

REVISÃO DE LITERATURA

Sousa (2016) define barragem como estruturas caracterizadas por sua construção transversal, que assumem a função de conter o fluxo e armazenar grandes volumes de água, rejeitos ou outros materiais.

Em barragens de terra, as causas mais frequentes de ruptura são o galgamento (ação erosiva da água no aterro) e o piping (erosão interna por percolação). Rupturas ainda podem ser causadas por instabilidade estática e liquefação. Já em barragens de concreto, o principal fator de acidentes é o deslizamento. (SOUZA, 2016).

Tais estruturas não são imunes a falhas ou rupturas, exigindo constante avaliação e gerenciamento dos riscos potenciais à população e ao meio ambiente. Dessa forma, a segurança de uma obra de barragem está intrinsecamente ligada ao cumprimento de normas e regulamentos técnicos de engenharia durante sua concepção e construção. No entanto, mesmo as estruturas mais rigorosamente projetadas e executadas não estão isentas de riscos. O comportamento anômalo de uma estrutura geotécnica pode gerar consequências indesejáveis de diversas magnitudes, impactando áreas como a

economia, o meio ambiente, a saúde e segurança pública, a opinião pública e a reputação técnica e política dos envolvidos. (SANTOS2006,)

A viabilidade e a segurança de barragens dependem de um processo rigoroso de coleta e análise de dados sobre suas condições. A consulta a normas, manuais, diretrizes e outras fontes técnico-científicas é fundamental para embasar decisões e garantir a segurança da estrutura.

Segundo Dias et al. (2016), as causas de colapso de barragens podem ser multifacetadas, abrangendo falhas no projeto, localização inadequada e negligência na construção e operação, levando ao comprometimento da estabilidade física da estrutura.

Destaca-se que a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) (BRASIL, 2010 e 2020) estabelece um conjunto de diretrizes que devem ser seguidas durante todo o ciclo de vida de uma barragem, desde a sua concepção até a desativação, incluindo as etapas de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento, primeiro vertimento e operação para garantir uma maior segurança da estrutura.

A etapa de descaracterização não fazia parte das legislações e era pouco empregada no setor, sendo usada em casos em que o reaproveitamento do rejeito depositado era economicamente viável. Em função do histórico de rompimento de barragens de montante em Minas Gerais, a descaracterização dessas barragens se tornou obrigatória no Brasil em 2019 a partir da publicação da Lei Estadual nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019 (MINAS GERAIS, 2019) e com a publicação da Resolução nº 13, de 8 de agosto de 2019, da Agência Nacional de Mineração (ANM) (BRASIL, 2019) e posteriormente pela modificação da própria Política Nacional de Segurança de Barragens, de 30 de setembro de 2020. Segundo a Lei Estadual nº 23.291/2019 essas barragens deveriam estar descaracterizadas no prazo máximo de 3 (três) anos.

Massignan e Sánchez (2023) descrevem que tal exigência é uma iniciativa pioneira no mundo, para a qual existe escassa orientação técnica. Segundo os autores, grande parte da literatura não aborda a descaracterização

propriamente, e sim em sua maioria critérios de fechamento de barragens de rejeito ao encerrar sua vida útil e o seu descomissionamento.

Em 2019, após a publicação da Lei Estadual nº 23.291 houve as primeiras regulamentações quanto aos critérios técnicos de descaracterização de barragens. Por meio da Resolução Conjunta SEMAD/FEAM nº 2.784, de 21 de março 2019, e Resolução Conjunta SEMAD/FEAM/IEF/ IGAM nº 2827, de 24 de julho de 2019, Minas Gerais criou o comitê de especialistas para estabelecer as diretrizes e premissas de descaracterização de barragens que utilizem ou que tenham utilizado o método de alteamento a montante no estado de Minas Gerais.

Os trabalhos do comitê culminaram em um Termo de Referência - TR, que estabelece os requisitos mínimos de um Projeto para a Descaracterização de Barragens alteadas pelo método de montante no estado de Minas Gerais.

No referido termo a definição de barragem descaracterizada aparece como estrutura que não recebe rejeitos e/ou sedimentos oriundos de sua atividade fim deixando de possuir função de barragem, atendendo a adequada condição de segurança, de acordo com projeto técnico. Sendo que o projeto técnico de descaracterização compreenderá necessariamente, mas não se limitando, às seguintes etapas concluídas:

- I. Encerramento das operações com a remoção das infraestruturas associadas, tais como, mas não se limitando, a espigotes, tubulações, exceto aquelas destinadas à garantia da segurança da estrutura;
- II. Adoção de medidas efetivas para reduzir ou eliminar o aporte de águas superficiais e subterrâneas para o reservatório, não sendo permitido o trânsito de cheias no reservatório, no dimensionamento do sistema extravasor.
- III. Execução de medidas que visem garantir a estabilidade física, química e biológica de longo prazo das estruturas que permanecerem no local; e,
- IV. Acompanhamento pelo período necessário para verificar a eficácia das medidas adotadas para descaracterização.

O referido termo também apresenta um fluxograma da descaracterização que deve ser seguido pelos empreendedores de barragem ao executarem suas obras. Estabelecendo a ordem empregada de planejamento e execução. Sendo essas I) Consolidação das informações e Estudos Existentes; II) Diagnóstico da estrutura, avaliação da segurança atual da barragem; III) Projeto de descaracterização; IV) Intervenções Preliminares para segurança das obras de descaracterização; V) Drenagem e Retirada de Água; VI) Obras de Descaracterização e Recuperação da área VII) Monitoramento.

Na data limite estipulada pela Lei nº 23.291/2019 para a finalização da descaracterização das barragens alteadas por montante, apenas 10 (dez) estruturas haviam sido descaracterizadas como barragem, segundo os dados obtidos da Fundação Estadual do Meio Ambiente. Findado o prazo o o Ministério Público de Minas Gerais - MPMG, a Fundação Estadual do Meio Ambiente - Feam, e o Ministério Público Federal - MPF, com interveniência da Agência Nacional de Mineração -ANM, MPMG, assinaram junto com as empresas responsáveis pelas barragens de montante no estado de Minas Gerais um Termo de Compromisso, reiterando a obrigação dos empreendedores e estabelecendo a compensação e o ressarcimento ao Estado em razão de danos socioambientais, socioeconômicos e morais causados pelo descumprimento do prazo.

Após a assinatura do Termo o empreendedor passou a ser obrigado a apresentar projeto de descaracterização com cronograma atualizado, entregar relatórios periódicos de acompanhamento de obra e recursos, estudo de impacto ambiental e programa de educação ambiental. Outro diferencial do Termo é a implementação da obrigatoriedade de empresas externas serem auditoras do processo de descaracterização.

Os aspectos técnicos das descaracterizações no estado de Minas Gerais são acompanhados pela Fundação Estadual do Meio Ambiente – Feam e nacionalmente pela Agência Nacional de Mineração (ANM). Segundo os dados da Feam, para o acompanhamento das obras, o empreendedor segue um Termo de Referência -TR criado pelo setor técnico que acompanha as descaracterizações. O TR de acompanhamento de obra estabelece critérios a

serem adotados e apresentados pelo empreendedor no que diz respeito a estabilidade geotécnica da barragem, aos controles ambientais, monitoramento através das leituras de instrumentos e inspeções regulares.

METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos para realização deste trabalho constituíram-se em uma pesquisa qualitativa-descritiva com uso de dados bibliográficos.

A primeira etapa do trabalho consiste na realização de revisão bibliográfica em literatura especializada, artigos científicos e dissertações que envolvem o tema de descaracterização de barragens, seguida da pesquisa das legislações vigentes em nível estadual e federal, bem como nos instrumentos publicados que envolvem o tema como termos de referência e manuais.

Em sequência, para estabelecer os principais riscos e as possíveis anomalias que podem ocorrer na descaracterização de uma barragem, foi feita seleção de documentos contidos na base de dados da Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais- Feam. Os documentos foram divididos em dois grupos que estabelecem a fases da descaracterização analisada: 1) Fase de projeto; 2) Fase de obra. Para a análise do primeiro grupo, fase de projeto, os documentos escolhidos foram as Notas de avaliação dos projetos de descaracterização das barragens de montante no estado de Minas Gerais, elaboradas pela equipe técnica independente. Optou-se por usar as Notas ao invés do projeto propriamente dito uma vez que esses documentos já exercem o papel de mapear as falhas, pendências e recomendações ao projeto elaborado pela proprietária da barragem.

Para o segundo grupo da pesquisa foram usados os Relatórios Técnicos de acompanhamento da obra de descaracterização das barragens de montante do estado de Minas Gerais, elaborados pelos proprietários das barragens, bem como as Notas Técnicas que auditaram cada um desses relatórios, elaboradas por equipe técnica independente que acompanha a descaracterização. Foram escolhidos os documentos referentes ao último trimestre de 2023 por se tratar

de documentos mais recentes e com o histórico das anomalias desde o início das obras.

A pesquisa envolveu a coleta, análise e interpretação de conjuntos de dados disponibilizados pela Fundação Estadual do Meio Ambiente que foram anonimizados, agregados e generalizados para evitar a identificação de informações sensíveis e de modo a proteger a privacidade da instituição e empreendedores.

Para se estabelecer os principais fatores de risco ao longo do planejamento e execução de obras de descaracterização, foram selecionadas para o estudo 8 (oito) barragens em diferentes estágios de descaracterização, sendo 2 (duas) em estágio de elaboração de projeto onde a obra de descaracterização ainda não foi iniciada (Barragem A e B), 4 (quatro) com obras iniciadas em estágio até 50% concluída (Barragens C, D, E e F) e 2 (duas) em estágio avançado de descaracterização (Barragens G e H), ou seja, duas barragens contemplaram a análise do grupo 1 referente a fase de projeto e 6 barragens ao grupo 2, fase de obra. Todas as barragens selecionadas são estruturas de contenção de rejeito da mineração, como é evidenciado na tabela 1;

Tabela 1 – Barragens usadas no estudo

Barragem	Tipo	Estabilidade	Método de descaracterização
A	Rejeito da mineração	Negativa	Estabilização no local
B	Rejeito da mineração	Positiva	Desmonte total
C	Rejeito da mineração	Positiva	Desmonte total
D	Rejeito da mineração	Negativa	Desmonte total
E	Rejeito da mineração	Negativa	Estabilização no local
F	Rejeito da mineração	Negativa	Estabilização no local
G	Rejeito da mineração	Positiva após a obra	Desmonte total
H	Rejeito da mineração	Positiva	Mudança de método

Fonte: autor

No grupo referente a fase projeto de descaracterização foram adotados 2 parâmetros de análise: I) Aderência as exigências legais e boas práticas da engenharia; II) Estudos realizados ou faltantes. No segundo grupo referente a fase de obra foram analisados 5 (cinco) parâmetros: I) Possíveis Falhas; II) causa das falhas; III) possíveis efeitos das falhas; IV) formas de monitoramento; V) Ações preventivas.

Para a proposição de mecanismos de controle e monitoramento foi feita uma correlação entre os principais problemas e anomalias listados com as possíveis soluções ou mitigações a serem realizadas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Todas as 8 (oito) barragens selecionadas são estruturas alteadas pelos métodos de montante e estão obrigadas por lei vigente a serem descaracterizadas. Dentre as barragens nessa condição no Estado de Minas Gérias a escolha daquelas que fizeram parte do grupo amostral, em diferentes estágios de descaracterização, foi guiado por critérios deliberadamente escolhidos pelo autor visando atender aos objetivos da pesquisa. Essa escolha intencional foi fundamentada pela acessibilidade e pela representatividade potencial dentro do contexto da investigação proposta.

Assim, as 2 (duas) barragens escolhidas para representar o grupo de estruturas que estão em fase de desenvolvimento de projeto são estruturas com diferentes históricos de comportamento, mas que passam por desafios semelhantes no desenvolvimento do projeto.

Quatro barragens que foram escolhidas no estudo para representarem as estruturas em etapa de obra, são barragens que possuem registros de anomalias frequentes ao longo da obra. Em contrapartida, foram escolhidas também para esse grupo amostral, 2 (duas) estruturas para representar barragens em estágio final de descaracterização com eficácia no processo. Sendo escolhidas barragens onde o método de descaracterização se diferencia por remoção total e mudança de método.

PROJETO DE DESCARACTERIZAÇÃO

l) Aderência as exigências legais e boas práticas da engenharia;

Antes de iniciar um projeto de descaracterização, é essencial realizar uma série de ações coordenadas para adquirir um entendimento aprofundado da estrutura a ser modificada. Isso facilita a criação de um projeto que não apenas atenda às regulamentações, normas e leis existentes, mas também considere de forma abrangente os fatores sociais e ambientais relacionados. Um projeto é considerado adequado quando ele se alinha com todos esses requisitos, garantindo uma abordagem holística e responsável. (Franco, 2008)

Observou-se que os projetos das barragens A e B não apresentaram o atendimento completo ao Termo de Referência instituído pela Resolução Conjunta SEMAD/FEAM/IEF/IGAM nº 2817 e as diretrizes estabelecidas pela Norma Brasileira 13.028 da Associação Brasileira de Normas Técnicas _ ABNT NBR 13.028/2017. Na análise dos projetos a falta de estudo foi o fator principal para o não atendimento as diretrizes legais. Existem lacunas em sua maioria referente aos estudos sísmicos. Outro ponto que se mostrou com lacunas foi a apresentação detalhada junto da elaboração do projeto de um Programa de manutenção e monitoramento para o período pós-intervenção, até que o ambiente atinja a estabilidade geotécnica e ambiental, conforme é apresentado na tabela 2. A análise da aderência dos projetos se limitou as requisições estaduais.

Dois itens listados na Tabela 2 de atendimento não TR, são específicos para estruturar que adotaram a descaracterização por estabilização ou mudança de método, sendo eles o programa de manutenção e monitoramento para o período pós-intervenção e o cálculo de simulação dos fatores de segurança que a barragem tende a alcançar com a estabilização. Nesse caso apenas a Barragem A poderia atendê-los.

Registra-se que o Termo de Referência da Feam lista as informações e estudos considerados relevantes para fundamentar a construção do projeto. Contudo, como destacado no Termo, a inexistência de alguns estudos listados não inviabiliza a apresentação do Projeto para a Descaracterização de Barragens, cabendo ao projetista o dever de reunir as informações mínimas

necessárias para subsidiar as definições de projeto e garantir a segurança da estrutura durante os trabalhos de descaracterização.

Tabela 2 – Atendimento dos projetos Barragem A e B a legislação vigente

Barragem que o Projeto não atendeu as diretrizes completamente	Itens que não foram atendidos do termo de referência FEAM
A e B	Possuir Projeto de cobertura final com a utilização de tecnologia adequada.
A	Possuir programa de manutenção e monitoramento para o período pós-intervenção, até que o ambiente atinja a estabilidade geotécnica e ambiental.
A	Os projetos que visam a manutenção do maciço e do reservatório, após o processo de descaracterização, deverão alcançar, no mínimo, o Fator de Segurança de 1,5 para rupturas drenadas; 1,5 não drenadas de pico e 1,1 para residual. Ressalta-se que estes valores poderão ser revisados conforme as diretrizes técnicas emanadas de órgãos regulamentadores competentes.
Itens que não foram atendidos da ABNT NBR 13028 / 2017	
A e B	Estudos tecnológicos e caracterização física dos rejeitos
A e B	Caracterização química dos rejeitos
A e B	Estabilidade física
A e B	Instrumentação de controle
A e B	Base cartográfica com a indicação da fonte e precisão dos levantamentos
A e B	Relatório das investigações geotécnicas de campo e de laboratório, incluindo os registros de ensaios e boletins de sondagem
A e B	Todas as memórias de cálculo e critérios de projeto utilizados
A e B	Planilha de quantidades e serviços das obras civis
A e B	Especificações técnicas construtivas

Fonte: Elaboração do Autor

Conclui-se que os projetos das duas Barragens A e B não possuem o detalhamento esperado para o alto grau de sensibilidade de estruturas de montante, todavia alguns itens não atendidos completamente não indicam que para a elaboração do projeto deixou-se de analisar tais pontos, mas sim que esses não foram incluídos no seu corpo. Muitas vezes o projeto é construído em etapas que não são inseridas no corpo do documento, o que dificulta a real compreensão e análise do documento de forma separada;

II) Estudos realizados ou faltantes;

O Termo de Referência de projeto em uma primeira etapa estabelece os estudos necessários para uma obra de descaracterização. Para as duas barragens analisadas que estão em fase de construção de projeto observou-se que ambas apresentam deficiência na completa caracterização da estrutura e seu entorno. Esta caracterização envolve o conhecimento dos aspectos ambientais, sociais e climáticos que a barragem está inserida, como também, o conhecimento das condições da geomorfologia, dos aspectos geológicos, hidrogeológicos e geotécnicos bem como as condições de sismicidade específicas do local. Ressalta-se que para a barragem onde parte do rejeito depositado ficará remanescente, apontou-se ser necessária uma caracterização física e química deste material bem como o conhecimento adequado de suas propriedades de resistência, deformabilidade e sua reologia.

A falta de conhecimento amplo da estrutura, juntamente com a falta de estabilidade das barragens, são os principais fatores que deixam o processo de elaboração de projeto mais complexo. Isso porque antes de desenvolver a engenharia de descaracterização é necessário executar uma série de estudos e definir parâmetros, e até mesmo se pensar em mecanismos de retomada da estabilidade antes de iniciar uma descaracterização.

Nesse sentido, observou-se a falta de um mapeamento geológico da região, investigações geológico-geotécnicas nas fundações, é apontado como o ponto de maior insegurança na construção do projeto, por ser um ponto crucial na definição de alternativas de descaracterização.

No que diz respeito a execução desses estudos, foram relatados, nas duas barragens analisadas problemas na representatividade dos ensaios de amostras indeformáveis, havendo uma dúvida uma vez que os parâmetros encontrados em laboratório podem não ser representativas. Na ocorrência desses fatos, os estudos foram refeitos e reanalisados, causando um atraso na elaboração do projeto.

Nas duas estruturas analisadas, foi sugerido um plano de monitoramento específico para a descaracterização, incluindo o aumento de equipamentos em sua maioria automatizados.

Outra preocupação apontada nos dois projetos foi a deficiência de análises sísmicas da região que pudesse representar o comportamento da estrutura com o avanço de uma obra de descaracterização. Tal preocupação torna-se ainda maior no caso de estrutura sem estabilidade garantida. Sugeriu-se ainda que análise sísmica deveria ser complementada com uma análise de propagação de ondas, onde se estude, por exemplo, a amplificação da ação sísmica ao longo do terreno de fundação e do corpo da barragem.

Na situação de descaracterização com aplicação de reforço, Barragem A, exigiu-se um estudo de deformação do material usado. Tal sinalização vem da premissa que o uso de blocos não selecionados de rocha alterada, com finos, não compactados pode ter um comportamento ruim no que diz respeito a estabilidade e deformabilidade.

No que diz respeito as questões hidrológicas/hidráulicas, os principais pontos abordados foram execução de extravasores que atendam a norma vigente, bem como inicialmente construção de um canal de cintura para direcionar toda a contribuição natural direto ao extravasor, sem causar interferência no reservatório.

Alguns pontos técnicos foram abordados como: a) necessidade de ser evidenciado o volume considerado de amortecimento, b) inclusão do detalhamento dos sistemas de bombas acopladas no reservatório, assim como sua curva de esgotamento e o trânsito de cheias com os resultados encontrados. Em ambos os projetos foram apontadas a necessidade de uso de bombas no reservatório, mesmo com a construção do canal de cintura. As bombas exercem a função de controle do volume líquido interno do reservatório no momento da escavação do rejeito para a descaracterização, bem como é uma alternativa de segurança em caso de contribuição pluvial.

Registra-se que os Tempos de Retornos usado no dimensionamento das estruturas de drenagem superficial foi de 500 anos na barragem B, como estabelecido em norma estadual, e 10.000 na Barragem A. O critério de escolha baseou-se na necessidade local onde estão inseridas as barragens e no modo

de descaracterização. Barragens que se tornaram uma estrutura geotécnica estabilizada, tendem a permanecer com Tempos de Retorno maiores.

OBRAS DE DESCARACTERIZAÇÃO

Faz parte da descaracterização a análise dos riscos na aplicação da engenharia proposta. Assim, para a descaracterização das barragens em análise foi realizada sistematização de risco prioritário da obra. Tal análise geralmente é identificada na fase de engenharia conceitual, de modo a impedir que algum evento indesejado ocorra ou que caso corra, durante ou após a execução do projeto, possa ser minimizado. O processo envolveu a identificação dos modos de falha prováveis na execução do projeto de descaracterização.

Todas as barragens analisadas são estruturas de contenção de rejeito da mineração, susceptíveis ao modo de falha de liquefação. Das quatro barragens analisadas em etapa de obra de descaracterização, Barragem C, D, E e F, Três não apresentam estabilidade geotécnica, Barragem D, E e F. Das duas barragens com descaracterização concluída, apenas 1, a Barragem G não possuía estabilidade garantida, porém após a obra recebeu estabilidade positiva.

Para chegar ao objeto do estudo, que se propões a apresentar os principais fatores de risco ao longo do planejamento e execução de obras de descaracterização de barragem bem como estabelecer critérios de segurança baseados nas boas práticas de engenharia, foi feito o mapeamento dos possíveis riscos associados a descaracterização. Duas dessas barragens incluíram na etapa de elaboração do projeto a análise de risco, sendo referenciada ao longo da obra de descaracterização.

Foi feito um mapeamento dos principais fatores de risco, possíveis falhas e apresentado formas de controle e mitigação proposta pelo empreendedor e auditoria de forma conjunta, não sendo feitas avaliações individualizadas. O intuito é mapear as possíveis falhas que aparecem na maioria das barragens em descaracterização. Assim, foram identificadas 24 principais possíveis falhas associadas a obra de descaracterização das barragens. Essas se dividem as falhas relacionadas a instabilidades geotécnicas, hidráulicas, ambientais e de

gestão (tabela 3). Entende-se que algumas falhas podem se comportar diferente a depender de onde elas atingirem e sua magnitude. Todavia, para o estudo optou-se por agrupar as falhas de forma a simplificar a compreensão, sem que fossem detalhadas por região da estrutura.

A severidade das falhas foi apresentada pelas próprias mineradoras, em nenhuma barragem a auditora contestou a classificação dada pelas empresas. O critério de severidade estabelecido, em sua maioria, analisa a proporção de efeito da falha na sociedade, no meio ambiente, nos direitos humanos, na imagem e reputação da empresa e no gasto financeiro de recuperação. Assim, sendo dividida na maioria dos casos em Muito Leve, Leve, Moderada, Crítica e Muito Crítica. No estudo não foram selecionadas as falhas muito leves por geralmente serem associadas a gestão de rotina da estrutura e não enquanto gatilhos da descaracterização. De forma mais detalhada, para 3 estruturas foi usado a seguinte descrição das severidades. A saber.

No caso de falhas com severidade Leve, os efeitos são reversíveis, de baixo impacto com repercussão local com baixa repercussão na mídia e com gasto financeiro até R\$100milhoes.

No caso de falhas moderadas pode haver sequelas a trabalhadores reversíveis, impacto ambiental reversível em até 1 semana que pode ocasionar autuação dos órgãos fiscalizadores. Nessa situação é possível que existe repercussão em mídias regionais, em grupos sociais em um curto período. O gasto pode chegar a R\$300milhoes.

Para as situações de falhas críticas podem ocorrer efeitos irreversíveis a sociedade e trabalhadores, impacto ambiental de abrangência local, mas com tempo de recuperação natural do ambiente em torno de 1 ano. Podendo haver dano a atividades individuais e coletivas da sociedade. Nesse caso, a repercussão pode atingir mídias nacionais e haver manifestações. O valor financeiro pode chegar a R\$1 bilhão.

No último nível da escala de severidade estão as falhas muito críticas, podendo haver risco de morte, sem recuperação espontânea do ambiente, com medidas

de reparação que envolvem mais de 3 anos. Ocorrendo danos aos direitos humanos em comunidades vulneráveis afetando todo um modo de vida. A repercussão pode ser nacional e internacional, podendo a empresa ser condenada. O impacto financeiro supera os R\$ 2 bilhões. Todas as falhas muito críticas são aquelas que podem ocasionar ruptura global da barragem de forma imediata como a liquefação com progressiva

A descrição de cada nível de severidade da falha é apresentada, porém não é detalhado quais aspectos da falha levaram a percepção da sua severidade, o que leva a crer que são estipulados conforme a experiência da equipe que elabora o estudo.

Os efeitos das falhas devem ser descritos de forma conservadora, assumindo o risco máximo e o pior cenário da falha. Tal critério é adotado para que se tenham o maior número de medidas de mitigação, monitoramento e controle possível. Foram estabelecidas 7 falhas muito críticas, 6 falhas críticas, 5 moderadas e 6 leves.

Os modos de falha apresentados são aqueles que podem ocorrer durante a obra de descaracterização, sendo a própria obra um gatilho ou não. As áreas que já apresentaram anomalias tratadas, devem ser mapeadas e monitoradas de forma mais detalhada, uma vez que é possível o reaparecimento de anomalias.

Por isso, conhecer o histórico do comportamento da barragem e tratar as anomalias existentes é de suma importância para início da obra de descaracterização com maior segurança.

Tabela 3 - Principais fatores de risco ao longo da execução de obras de descaracterização

FALHA	CAUSA	EFEITO	SEVERIDADE	MONITORAMENTO	AÇÕES PREVENTIVAS
Deformação nos taludes	Recalque diferencias, peso de reforços e contra empilhamento.	Ruptura do Maciço devido à Instabilidade da barragem em descaracterização	Muito Crítico	Controle adequado de seleção e compactação do material	Boa distribuição dos materiais e compactação adequada garantindo o melhor entrosamento entre os grãos
Aumento do NA no maciço	capacidade de vazão insuficiente e geometria do sistema de drenagem ineficaz.	Ruptura do Maciço devido à Instabilidade da barragem em descaracterização	Muito Crítico	Acompanhamento Técnico de Obra (ATO)	Estudos Tensão x Deformação
Assentamentos Diferenciais de bermas de reforço	compactação ineficiente	atraso da obra e maiores gastos	leve	Monitoramento geotécnico (vibrações e deslocamentos)	Inspeção com Drones e Instrumentação; Recompactação/Acerto do Maciço durante a construção
Degradação do canal extravasor	Velocidades do fluxo superiores ao suportado pelo revestimento; deslizamentos laterais	Ruptura do Maciço Devido ao Galgamento	Crítico	Manutenções e Inspeções Regulares.	Construção de aterros experimentais para avaliação da compactação das camadas dos aterros de descaracterização
Cavitação do Vertedouro	erro na execução ou dimensionamento	comprometimento da integridade estrutural do vertedouro.	Crítico	Manutenções e Inspeções Regulares.	Controle da Velocidade de Fluxo; revisão das simulações e Modelagem Hidráulica; avaliar obras de adequação
Erosão nos taludes do maciço e bermas	Perda de resistência mecânica devido ao aumento de poropressões; Ocorrência de zonas de permeabilidade excessiva; proteção superficial inadequada; sistemas hidráulicos superficiais mal dimensionados; passagem de maquinas de sondagem.	Ruptura do Maciço da barragem em descaracterização	Crítico	inspeções visuais especialmente nos períodos chuvosos; leitura periódica de instrumentação	Revisão das simulações e Modelagem Hidráulico; avanço da obra em maior escala no período seco.
Erosão interna (piping)	carreamento das partículas em função de fluxo de água elevado em zonas de "vazios"; carreamento das partículas em função de fluxo de água elevado	Instabilidade da barragem em descaracterização causando ruptura da barragem	Muito Crítico	Monitoramento geotécnico (vibrações e deslocamentos); Monitoramento de poropressões	Estudo dos limites das vibrações e/ou poropressões induzidas pelos carregamentos para acionamento de TARPs; Análise da instrumentação. ; Estudos de Percolação e Análise de Fluxo; sondagens e Limpezas em DHps evitando colmatação; Em obras de reforço manter a boa distribuição dos materiais e compactação adequada.
Movimentação de massa	Saturação do solo; passagem de equipamentos	Instabilidade da barragem em descaracterização causando ruptura da barragem	Muito Crítico	Monitoramento geotécnico (vibrações e deslocamentos); Monitoramento de poropressões	

FALHA	CAUSA	EFEITO	SEVERIDADE	MONITORAMENTO	AÇÕES PREVENTIVAS
ruptura de taludes de ombreira	Saturação do solo; cortes inadequados	assoreamento de canal de drenagem, instabilização da estrutura em descaracterização	Crítico	estudo de estabilidade geotécnica para taludes dos acessos	rebaixamento do NA nas zonas de ombreira; proteção do talude, colocação de DHPs
Recalque	Falta de tratamento da fundação antes da obra, fundação em rochas altamente fraturadas ou não resistentes, material de canga na fundação. Assentamento excessivo no maciço ou fundação diretamente abaixo da área da depressão.	Instabilidade da barragem em descaracterização causando ruptura da barragem	Muito Crítico	Monitoramento geotécnico (vibrações e deslocamentos);	Tratamento da fundação antes da obra; Estudos Tensão x Deformação Investigações geológico-geotécnicas do maciço de fundação
Galgamento	Obstrução do canal vertedouro, falha no sistema de bombeamento, falta de controle do NA do reservatório.	Ruptura do Maciço devido a Galgamento	Muito Crítico	inspeções visuais especialmente nos períodos chuvosos; leitura periódica de instrumentação; controle do NA; construção de planos para o período chuvoso	Revisão dos estudos hidrológicos e hidráulicos, aumento dos sistemas de bomba
Gestão insuficiente da obra de descaracterização	incertezas de projeto, adversidades no campo, falha e quebra de equipamentos; mão de obra sem preparo; falta de ações de governança	atraso da obra, descumprimento de prazos legais	moderado	Acompanhamento Técnico de Obra (ATO)	Equipe de reparos e manutenção dos veículos nas proximidades da obra; treinamento de equipe; inserção de equipe de controle documental para governança
Liquefação	abalos sísmicos da obra (equipamentos, escavação, reforço)	Ruptura da barragem	Muito Crítico	Verificar a operacionalidade dos protocolos de emergência; Atualização/Treinamento PAEBM - Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração	Estudo dos limites das vibrações e/ou poropressões induzidas pelos carregamentos para acionamento de TARPs; Complementação da análise sísmica com análise de propagação de onda, sendo esta aplicada às análises de estabilidade dos taludes; realizar estudos das características e propriedades geotécnicas do material de fundação
assoreamento sistemas de drenagem superficiais	Resto de poda, erosão dos taludes, subdimensionamento; falha na geometria e decaimento	redução da capacidade hidráulica, saturação de áreas do maciço, erosão	moderado	Acompanhamento Técnico de Obra (ATO)	Revisão dos estudos hidrológicos e hidráulicos; realizar obras de reparo e correção de trincas;
Insuficiente capacidade de dissipação do canal vertedouro	delizamento de taludes laterais; canal previamente assoreado; tubulações de bombeamento ao longo do canal	Elevação do NA	moderado	Acompanhamento Técnico de Obra (ATO)	Revisão dos estudos hidrológicos e hidráulicos; realizar obras de reparo e correção de trincas;

FALHA	CAUSA	EFEITO	SEVERIDADE	MONITORAMENTO	AÇÕES PREVENTIVAS
Obstrução dos acessos a obra	deslizamento de taludes; volume excessivo de maquinários; desorganização logística	atraso na obra	leve	Acompanhamento Técnico de Obra (ATO); instalação de câmeras nos acessos; instalação de Pare/Siga;	proteção dos taludes, execução e revisão frequente de plano de obra
Obstrução do emboque do vertedouro	carreamento e acomodação do Rejeito escavado durante a obra	Elevação do NA	moderado	Acompanhamento Técnico de Obra (ATO)	Execução de canais e sumps dentro do reservatório, controle da inclinação dos taludes de escavação; limpeza e manutenção constante.
Paralisação do sistema de bombeamento	Obstrução da tubulação das bombas por Rejeito bombeado do reservatório	perda das bombas, aumento do NA, falta de controle de sedimentos	leve	dimensionar tubulação; equipe de campo especializada	Controle de sedimentos; controle da Vazão; instalação de bomba reserva.
falta de áreas para disposição do rejeito escavado	erro no cálculo de volume de rejeito; falta de licenciamento de pilhas; falta de equipamentos	atraso da obra	leve	-	Inserção de equipe de controle documental para governança; equipe específica para controle da pilha e área de bota-fora
Transbordamento do sistema de drenagem superficial	Resto de poda, erosão dos taludes, subdimensionamento; falha na geometria e decaimento	redução da capacidade hidráulica, saturação de áreas do maciço, erosão	moderado	Acompanhamento Técnico de Obra (ATO)	Revisão dos estudos hidrológicos e hidráulicos; realizar obras de reparo e correção de trincas;
Subdimensionamento dos equipamentos de obra	Quebra de equipamentos; falta de recurso; falta de empresa especializada	atraso da obra	leve	-	Plano de recurso atualizado por etapa da obra
Turbidez excessiva em mananciais	carreamento do Rejeito escavado durante a obra; carreamento de sedimentos da obra	Poluição ambiental	Crítico	Amostragens periódicas	realização de plano de monitoramento específico para a descaracterização; aumento dos pontos de coleta; aumento da periodicidade; construção de sumps a montante do manancial; uso de tratamento devidamente controlado
Ruptura de taludes de escavação	NA elevado; geometria equivocada dos taludes; dificuldade de operação dos equipamentos	Instabilidade da barragem em descaracterização	Crítico	Monitoramento de poropressões	rebaixamento do NA; instalação de poços de alívio(quando possível); controle da geometria da escavação;
Atolamento de equipamentos	NA não controlado; falta de gestão de obra	atraso da obra	leve	Acompanhamento Técnico de Obra (ATO)	Plano de escavação prevendo áreas de acesso de equipamento, controle de NA.

Fonte: Autor.

Observa-se, com a delimitação das causas das falhas, que para uma melhor gestão de segurança durante a descaracterização de uma barragem é recomendado complementar os estudos em relação a sismos, com análise de propagação de onda, e implementar análises com os limites de vibrações induzidas por equipamentos. Em uma das barragens analisadas, foi desenvolvido testes piloto de escavação para estabelecer os limites sísmicos da escavação do reservatório da estrutura. Tal medida visa entender melhor o comportamento da estrutura frente a uma obra de descaracterização

Da mesma forma, ao analisar as causas das falhas, identificou-se que para o caso de obras que utilizam aterros estabilizantes e de preenchimento é ideal que o critério de compactação de projeto seja bem executado em campo, garantindo o mínimo possível de volume de vazios, e a boa distribuição dos materiais. Sendo fundamental cuidado nos contatos entre materiais. Em duas das barragens analisadas foram feitos testes de compactação fora da área da barragem para garantir que o padrão projetado conseguisse ser cumprido.

Em todas as barragens analisadas foi feito o incremento de instrumentos para garantir a segurança da estrutura ao longo do tempo. Nota-se que foi recomendado em todas as estruturas a instalação de instrumentos para leituras de poropressões na fundação. Não obstante, o uso de radar para monitoramento de deslocamento vem sendo usado em maior escala e contemplando também áreas adjacentes da barragem. Para aquelas barragens que passam por uma descaracterização com remoção parcial ou total do reservatório/maciço, destacou-se a importante de reinstalação e rebaixamento dos instrumentos ao longo do desenvolvimento da obra.

As questões hidrológicas e hidráulicas se mostraram de suma importância para a segurança das obras de descaracterização. Foi feito para todas as estruturas analisados um planejamento da obra específico para o período chuvoso e seco. A adaptação dos extravasores para atender a norma também foi executado nas duas estruturas que finalizaram as obras sem intercorrências. Ao longo da obra o extravasor foi sendo rebaixado e adaptado para manutenção da segurança hidráulica da estrutura.

Os sistemas de drenagem interna devem estar funcionando de modo a garantir que não exista percolação no maciço e ocorrência de erosão interna. Sendo importante a realização de estudos de Percolação e Análise de Fluxo, e geofísicos, quando necessários.

A falta de controle ambiental ao longo da obra foi mencionada pelas auditorias para todas as barragens. Sendo a deficiência das amostragens de qualidade da água e a falta de um plano específico para controle de sedimentos os pontos de maior criticidade. Em duas barragens em etapa de obra, Barragem C e F relatou-se o uso de coagulantes e fluoculantes para o controle de sedimentos. Segundo a auditora esse uso muitas vezes não é feito de forma calculada, sendo aplicado de forma experimental e visual no campo.

Existe a possibilidade de uma possível poluição dos cursos d'água em função das obras. Isso porque, como é visto na tabela 2, diversas falhas podem ocorrer aumentando o carreamento de sedimentos. A própria necessidade de rebaixamento do nível de água pode gerar o bombeamento de um volume de rejeito que se não desviado chega no manancial. Por esse motivo, é observado que a principal medida de controle é a execução de sump que exercem a função de diminuição da velocidade desse fluxo e de clarificação desse efluente. A construção de sumps e canais de desvio para controle de sedimentos foi identificado em todas as barragens analisadas.

De modo geral, o projeto de descaracterização precisa ser bem estruturado e com bom grau de maturidade para dar suporte à implantação da obra. Os critérios e premissas que nortearam o seu desenvolvimento devem atender às normas técnicas vigentes e devem ser aplicadas em campo durante toda a etapa de descaracterização.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A descaracterização busca reduzir o risco de ruptura das barragens, mitigar danos ao meio ambiente e às comunidades locais, além de atender a exigências legais mais rigorosas. Ao descaracterizar essas estruturas de forma segura e

eficaz, é possível promover a segurança das populações próximas, e preservar ecossistemas sensíveis.

Por meio do estudo entende-se que nem sempre os projetos possuem o detalhamento esperado para o alto grau de sensibilidade de estruturas de montante. A falta de um mapeamento geológico da região, investigações geológico-geotécnicas nas fundações é apontado como o ponto de maior insegurança na construção do projeto. Não obstante, o número elevado de falhas muito críticas que podem ocorrer durante a descaracterização que acarretam a sua ruptura exige que cada etapa da obra seja minuciosamente planejada, sendo adotados todas as medidas viáveis de monitoramento, prevenção, mitigação e controle.

Na etapa de obra, o estudo de abalo sísmico para adoção dos limites das vibrações de equipamentos e a adequação dos sistemas hidráulicos foram citados como fundamentais nas barragens que não possuem estabilidade garantida. Quanto ao monitoramento, evidenciou-se o aumento do número de instrumentos/equipamentos em todas as barragens analisadas. O controle ambiental foi apontado como insuficiente em 6 das barragens analisadas, de modo geral destacou-se baixo número de amostragens de qualidade da água e deficiência no controle de sedimentos.

Recomenda-se que nos próximos estudos sejam feitas caracterizações pelo método de descaracterização adotado, estabilização no local ou remoção parcial/total.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Relatório de segurança de barragens 2022. Brasília, DF: ANA, 2022

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

1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília, DF: Presidência da República, 2010.

BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Brasília, DF: Presidência da República, 2020.

CALDEIRA, L. (2005) Análise de Risco em Geotecnia. Aplicaçãoa Barragens de Aterro. Programa de Investigação para Otenção de Habilitação para Funções de Coordenação Científica (in Portuguese). LNEC, Lisbon,238 pp.

DIAS, R. E. S. A.; SOUZA, D. O. O.; COSTA, M. F.; DIAS, N. T. C.; DIAS, A. C. S. A. Gestão de risco de barragens de rejeitos de mineração: prevenção nas etapas de planejamento e operação do empreendimento. In: CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE DE POÇOS DE CALDAS, 13., 2016, Poços de Caldas. Anais [...]. Poços de Caldas: GSC Eventos Especiais, 2016.

ECKHOFF, R. K. Review of some methods of hazard and risk analysis. In: ECKHOFF, R. K. Explosion hazards in the process industries. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2016. Cap. 11, p. 501-521. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803273-2.00011-6>.

Espósito, T.; Caldeira, L. & Naghettini, M. (2011a) Application of Location, Cause and Failure Indicators diagrams (LCI) to Tailings Dams. Proc. 6th International Conference on Dam Engineering. Lisbon, Portugal.

Espósito, T.; Caldeira, L. & Naghettini, M. (2011b) Aplicação da metodologia análise por diagramas de localização, causa e indicadores de falhas (LCI) em barragens de contenção de rejeitos. Proc. VII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, REGEO' 2011, e VI Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, Geossintéticos' 2011. Belo Horizonte, Brazil.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. Portaria nº 699, de 07 de junho de 2023 - Formaliza os procedimentos do Programa de Gestão de Barragens da Feam e dá outras providências.

FONSECA M. N. E. Análise dos modos de falha e efeitos (fmea) Para avaliação de um acidente em barragem de rejeitos :um evento de mineração no brasil. Dissertação - Universidade Federal da Baria -UFBA, 2018

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. Improving tailings dam safety: critical aspects of management, design, operation and closure.Paris: ICOLD, 2011. 180 p. (Bulletin, 139).

LAURIANO, A. W. Estudo de ruptura da Barragem de Funil: comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS. 2009. 251 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009

MARTINI, B. D. Sistema WEB para gestão de segurança de barragens. 2018. 95 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

MASSIGNAN R. S. & Sánchez L. E. O que significa descaracterizar barragens de rejeitos de mineração? Uma revisão sistemática da literatura. Revisão da Literatura (2023). DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200422>

MELO, A. V. Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: estudo de caso de barragens da CEMIG GT. 2014. 244 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

MINAS GERAIS. Lei 23.291, de 25 de fevereiro de 2019. Institui a política estadual de segurança de barragens.

RUPPENTHAL, J. Gerenciamento de riscos. Santa Maria: Rede e-Tec Brasil, 2013.

SANTANA, H. L.; GARCIA, P. R.; GARCIA, G. F. Segurança de barragens, monitorada por instrumentação. Revista Brasileira de Ciências, Tecnologia e Inovação, Uberaba, v. 1, n. 2, p. 1-8, 2015.

SANTOS, R. (2006) Enquadramento das Análises de Riscos em Geotecnia. Dissertação de Mestrado em Geotecnia para Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisbon, 257 pp.

SOUZA, D. H. C. Análise probabilística e de sensibilidade dos parâmetros de um estudo de rompimento hipotético: barragem de terra. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

USBR – UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION. Best practices in dam and levee safety risk analysis. Washington, D.C.: USBR, 2019.

SALIBE [1] A. B. & Gobbi A.* Gerenciamento de risco de barragens do estado do Paraná: uma abordagem bibliográfica. Revista Principia (2023) Vol. 60 N1. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6107>