

AValiação DE SEGURANÇA DE BARRAGEM: ANÁLISE GEOTÉCNICA E CLASSIFICAÇÃO – ESTUDO DE CASO DE BARRAGEM DE MINERAÇÃO

DAM SAFETY ASSESSMENT: GEOTECHNICAL ANALYSIS AND CLASSIFICATION - A MINING DAM CASE STUDY

Talyta Tuane Lima Melo¹
André Vinicius Azevedo Borgatto²

RESUMO

As barragens são obras de engenharia que têm como função o barramento de uma região para contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou mistura de carga sólida e líquida. Na área de mineração, essas estruturas recebem rejeitos e/ou sedimentos oriundos de atividade de mineração. O rompimento de uma barragem resulta em impactos sociais, ambientais e econômicos, na maioria das vezes, irreversíveis, como ocorrido nas Barragens de Fundão e Córrego do Feijão, em Minas Gerais. Por esta razão, é indispensável a avaliação da segurança de barragens, pois esta possibilitará intervenções preventivas e corretivas em tempo hábil, em prol da segurança da estrutura, do meio ambiente e de terceiros em sua área de influência. Esse trabalho apresenta um estudo de caso de uma barragem de mineração cujo propósito é a avaliação da segurança geotécnica e classificação da estrutura conforme legislação vigente, a partir das condições atuais da barragem. Para alcançar esses objetivos, realizou-se a aquisição de informações da barragem e as análises da instrumentação, do sistema de drenagem interna e da estabilidade do talude de jusante do barramento; além da pesquisa bibliográfica referente a legislação aplicada para classificação de barragens de mineração. Por fim, concluiu-se que, no período analisado, a estrutura apresentava condições geotécnicas aceitáveis, além de fatores de segurança satisfatórios conforme a NBR 13.028/2017. Em relação a classificação, conforme à Resolução ANM n° 95/2022, o dique de contenção é classificado em relação à Categoria de Risco (CRI) é Baixo e em relação ao Dano Potencial Associado (PDA) é Médio.

Palavras-chave: avaliação; segurança; classificação; barragem.

ABSTRACT

Dams are engineering works whose function is to dam up a region to contain or accumulate liquid substances or a mixture of solid and liquid loads. In the mining area, these structures receive tailings and/or sediments from mining activities. The collapse of a dam results in social, environmental, and economic impacts, in most cases irreversible, as occurred in the Fundão and Córrego do Feijão Dams, in Minas Gerais. For this reason, the evaluation of dam safety is indispensable, as it will enable timely preventive and corrective interventions, for the safety of the structure, the environment, and third parties in its area of influence. This work presents a case study of a mining dam, whose purpose is the evaluation of geotechnical safety and classification of the structure according to current legislation, based on the current conditions of the dam. To reach these objectives, information about the dam was acquired and the instrumentation, internal drainage system and downstream slope stability were analyzed. Finally, it was concluded that, during the period analyzed, the structure presented acceptable

¹ Bacharelanda em Engenharia Civil pela Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, 2022.

² Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

geotechnical conditions, in addition to satisfactory safety factors according to NBR 13.028/2017. Regarding classification, according to ANM Resolution nº 95/2022, the containment dike is classified in relation to the Risk Category (CRI) is Low and in relation to the Associated Potential Damage (PDA) is Medium.

Keywords: assessment; safety; classification; dam.

INTRODUÇÃO

Segundo a Comissão Mundial de Barragens (CMB, 2000), as barragens são obras geotécnicas que começaram a ser construídas milhares de anos atrás e, a partir de 1950, o crescimento da população condicionou o aumento na quantidade de barragens, com o intuito de atender, principalmente, as necessidades de geração de energia elétrica e abastecimento de água. Além destas, as barragens têm como finalidade irrigação, controle de enchentes, contenção de rejeitos, navegação interior, piscicultura, recreação, entre outros.

De acordo com Lei 12.334/2010 (atualizada pela Redação dada na Lei 14.066/2020) a barragem é uma obra composta pelo barramento e estruturas complementares, construída ao longo do curso de água ou externo a este, com o propósito de conter ou acumular substâncias líquidas ou misturas de carga sólida e líquidos. Na área da mineração, as barragens são dispostas para fins como acumulação, contenção e descarga de materiais provenientes do beneficiamento do minério (Agência Nacional de Mineração, ANM, 2022). De acordo com a NBR 13.028/2017, o termo “dique” é comumente utilizado na mineração em referência às estruturas de contenção de sedimentos advindas das pilhas de estéril (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2017).

Conforme Costa (2012) as barragens convencionais, que são as mais empregadas e cujo mecanismo é bastante difundido, podem ser classificadas quanto ao material empregado na construção em barragens de terra, enrocamento, concreto e as barragens mista. Chiossi (2013) aponta que as barragens de terra se subdividem em

homogênea e zoneada. As barragens de enrocamento subdividem-se de acordo com o sistema de permeabilização empregado em núcleo impermeável e face impermeável. Conforme Filho & Nummer (2014), as barragens de concreto são agrupadas em gravidade maciça, gravidade aliviada, de contraforte, de concreto rolado e abóbada.

No âmbito da engenharia de barragens, uma das principais vertentes é a segurança de barragens, tendo em vista que o rompimento dessa estrutura resulta em impactos sociais, ambientais e econômicos, na maioria das vezes, irreversíveis. O Relatório de Segurança de Barragens (RSB, 2022), realizado anualmente pela Agência Nacional de Águas (ANA), aponta que há, em média, 8 acidentes com barragens por ano, no Brasil. Apesar disso, as discussões sobre o tema no meio técnico e na imprensa só foram impulsionadas após os desastres ocorridos na Barragem de Fundão, em Mariana, e Barragem Córrego do Feijão, em Brumadinho, nos anos de 2015 e 2019, respectivamente, ambas barragens de rejeitos no estado de Minas Gerais.

De acordo com Pereira (2021), para realizar a avaliação de desempenho de uma barragem é necessário definir os parâmetros de segurança desta por meio da instrumentação e inspeções visuais de campo. Por esta razão, é indispensável e previsto na legislação o monitoramento do funcionamento e do estado de conservação da barragem. Os instrumentos instalados em uma barragem devem dispor características de acurácia, sensibilidade, precisão, conformidade, linearidade etc., vista as funções de segurança e redução de custos do empreendimento (MACHADO, 2007).

A instrumentação geotécnica surgiu entre as décadas de 1930 e 1940 e incluía

instrumentos mecânicos e hidráulicos (WHA, 1999). Segundo Fonseca (2003), a instrumentação das barragens de terra e enrocamento inclui instrumentos para medição de vazões, deslocamentos, nível d'água, poropressões, entre outros. Cruz (1996) afirma que os três principais objetivos da instrumentação são a verificação das premissas adotadas em projeto, da adequação dos métodos construtivos e das condições de segurança das obras.

A instrumentação possibilita intervenções preventivas e corretivas em tempo hábil, reduzindo o risco de acidentes e preservando a segurança da estrutura, do meio ambiente e de terceiros em sua área de influência. Por essa razão, as boas práticas de engenharia recomendam que o monitoramento da obra ocorra durante e após a construção do empreendimento (CAPUTO, 2021).

A segurança de barragens considera também a análise de estabilidade dos taludes do barramento. Para atender as condições de segurança, operacionalidade, economicidade e desativação, a NBR 13.028 (ABNT, 2017) dispõe os requisitos mínimos para elaboração e apresentação de projetos de mineração. O item 5.4.10.1 desta norma recomenda que sejam realizadas análises determinísticas de estabilidade, com a obtenção de valores mínimos de fator de segurança (FS). As superfícies potenciais, em análise, devem considerar possíveis rupturas locais e globais, para as condições de carregamento drenado ou não drenado, de cada um dos materiais envolvidos.

No que tange à classificação de barragens, a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), estabelecida pela Lei nº 12.334/2010 contempla, entre seus instrumentos, o sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). As barragens de mineração, por sua vez, são classificadas pela Resolução ANM nº 95, de

7 de fevereiro de 2022, em consonância com a Lei nº 12.334/2010.

Esse trabalho apresenta um estudo de caso de uma barragem de mineração cujo propósito é a avaliação da segurança geotécnica, através das análises da instrumentação; instalada no barramento e no reservatório; do sistema de drenagem interna e da estabilidade do talude de jusante do barramento, com auxílio dos dados obtidos a partir do monitoramento e das inspeções de campo. Ademais, busca-se propiciar conhecimento atualizado ao meio técnico em relação a legislação aplicada para classificação de barragens de mineração e classificar a estrutura em estudo, conforme tal, considerando as condições atuais da estrutura.

METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos citados anteriormente, a metodologia desse trabalho consistiu, essencialmente, na aquisição de informações de uma barragem de mineração. Por razões de confidencialidade, alguns dados de identificação da estrutura não podem ser divulgados. Ressalta-se, no entanto, que as informações expostas nesse trabalho expressam de maneira fidedigna o comportamento da estrutura, que se encontra em operação e por essa razão requer o estudo de classificação e avaliação da segurança.

ESTUDO DE CASO - DIQUE DE CONTENÇÃO DE SEDIMENTOS

Para realização desse trabalho, teve-se acesso ao acervo da empresa TPF Engenharia, escritório de Minas Gerais, para obter informações das características técnicas e projetos da barragem estudada.

Descrição Geral da Estrutura

Para inteirar-se sobre as características do dique; tais como método construtivo, finalidade, altura, área e

volume do reservatório; foi examinada a documentação disponibilizada, que incluiu, dentre outros, Projeto Executivo, *As Built, As Is, Dam Break*, PAEBM (Plano de Ação de Emergência de Barragens de Mineração), levantamentos topográficos e Manual de Operação.

Análise da Instrumentação

Os instrumentos essenciais para o controle da segurança e funcionamento adequado das barragens incluem os que permitem a observação dos deslocamentos, subpressão e vazões de percolações da estrutura. Nesse sentido, este trabalho realizou, por meio de aquisição e interpretação dos dados, a avaliação dos instrumentos do dique de contenção que monitoram as deformações do maciço, por meio do prismas de deslocamentos, além daqueles que acompanham o comportamento da água superficial do reservatório, através da régua limnimétrica, e da água subterrânea que percola pela fundação e em diferentes pontos ao longo maciço, mediante os piezômetros e medidores de vazões.

Análise de Estabilidade

Para proceder a análise da estabilidade da estrutura, elaborou-se, inicialmente, uma modelagem da seção geométrica típica e ideal da estrutura em análise, a partir do software ZWCAD 2020, da ZWSOFT. Adiante, foram estabelecidas as premissas dos materiais constituintes da seção, tais como parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais constituintes da seção, por intermédio das investigações geológicas/geotécnicas.

Em seguida, foram estabelecidos os cenários de cálculo a serem considerados na verificação da condição da estabilidade, conforme estabelecido na NBR 13.028 (ABNT, 2017), na Resolução nº 95 da ANM e nas boas práticas de engenharia, sendo estes:

I. Condição de “operação normal” sem alterações de geometria/configuração da barragem; poropressões

estabelecidas por piezométrica de rede de fluxo estabelecida e nível máximo do reservatório.

- II. Condição extrema, referente a freática mais elevada, considerando colmatação parcial do sistema de drenagem interna.
- III. Solicitação sísmica, com nível máximo do reservatório.

Nas análises de estabilidade do Cenário I, as superfícies freática e/ou piezométrica foram definidas a partir da instrumentação de monitoramento geotécnico e interpretação das leituras dos INAs e/ou PZs, instalados preferencialmente ao longo das superfícies de ruptura. Nesse caso, foram consideradas as médias históricas de cada instrumento analisado;

No Cenário II, as superfícies freática e/ou piezométrica foram estipuladas a partir das máximas leituras fornecidas pelos INAs e/ou PZs, instalados ao longo das seções das análises de ruptura. Ademais, foi realizada uma análise crítica das datas das máximas leituras observadas, escolhendo-se um dia crítico de medição e considerando-se as leituras deste dia;

O Cenário III envolveu as análises pseudoestáticas para o problema de sismicidade na barragem, com o nível máximo do reservatório a ser considerado semelhante ao Cenário I. As análises pseudoestáticas são métodos simplificados de dimensionamento sísmico, cuja abordagem pode ser vista em detalhes no USBR-United States Bureau of Reclamation (1987), bem como em outras referências estrangeiras como USCOLD (1995) e CDSA (1997).

As análises de estabilidade foram realizadas com o auxílio do software SLIDE2 2020, desenvolvido pela Rocscience, adotando-se:

- Critério de ruptura de Mohr-Coulomb e superfícies circulares e poligonais de ruptura;
- Métodos de equilíbrio-limite de Morgenstern-Price (1965), Sarma (1979) e Spencer (1967). Estes foram selecionados por serem considerados

métodos rigorosos, visto que satisfazem as três equações de equilíbrio para um sistema bidimensional.

Classificação Conforme Resolução 95 da ANM, 2022

Concomitantemente ao exposto, foi realizada uma pesquisa bibliográfica referente a legislação aplicada para classificação de barragens de mineração e aplicação desta para o dique de contenção. A classificação apresentada neste trabalho atendeu aos critérios estabelecidos pela Resolução ANM n° 95/2022 e baseou-se nos documentos disponibilizados pela empresa até a data de 30 de junho de 2022, e nas observações de campo obtidas na visita 14 de junho de 2022.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme disposto na documentação concedida, a estrutura em estudo é um dique de seção em terra homogênea, construído em etapa única no ano de 2011, com finalidade de contenção de sedimentos provenientes da Pilha de Deposição de Estéril (PDE). A altura máxima de projeto do barramento é de 12,19 m, conforme definição da Lei 12.334/2010, e a fundação e as ombreiras são compostas por solo laterítico associado com camadas de solo mole e aluvião. A área e o volume de projeto do reservatório são aproximadamente de 8.900 m² e 18.800 m³, respectivamente.

AValiação DE SEGURANÇA GEOTÉCNICA

A seguir, é descrita a avaliação de segurança geotécnica que contempla as avaliações do monitoramento, do sistema de drenagem interna e da estabilidade do dique de contenção de sedimentos.

Avaliação do Monitoramento

Apresenta-se a seguir os gráficos da instrumentação instalada no dique e suas

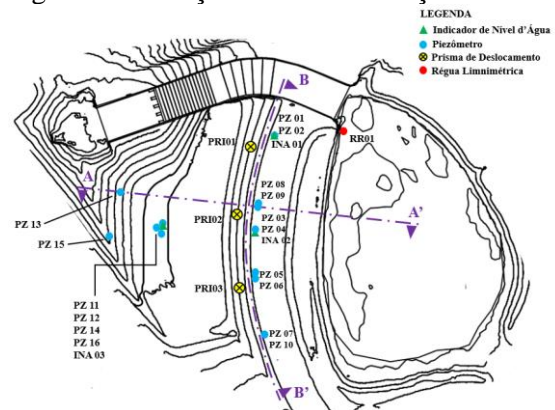
respectivas análises. Os gráficos foram elaborados com base em dados obtidos para o período entre janeiro de 2020 a junho de 2022, exceto para os prismas de deslocamentos.

De acordo com os relatórios de instalação de instrumentos e Plano de Segurança de Barragem (PSB), o maciço e a fundação são monitorados por 16 piezômetros (PZs) e 3 indicadores de nível d'água (INAs), além de 3 prismas. Para controle do nível de água, existe uma régua limnimétrica instalada no reservatório, RR01. O dique também dispõe de um pluviômetro para aquisição de dados de precipitações, PL01.

Destaca-se que a frequência de aquisição de leitura é mensal para os prismas, diária para o pluviômetro e quinzenal para os demais instrumentos, além disso as leituras são realizadas manualmente, exceto para o pluviômetro.

A planta de locação dos piezômetros, INAs, prismas e régua limnimétrica instalados no dique é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Locação da instrumentação.



Fonte: Adaptado de TPF, 2022.

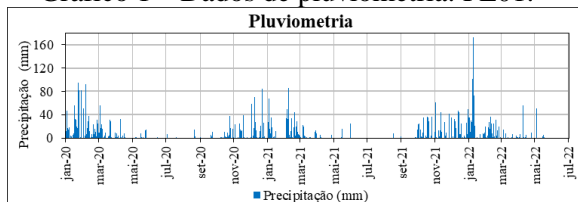
Pluviometria

O estudo hidrológico é aplicado no projeto de barragens para subsidiar as decisões de localização do empreendimento, no tipo de barragem e no dimensionamento das estruturas hidráulicas. Durante a operação da estrutura, a análise hidrológica auxilia na

previsão de vazões e de variações do nível freático, auxiliando o gerenciamento de barragens e dos sistemas de alerta de cheias.

No período analisado, o mês de janeiro de 2022 apresentou os maiores índices pluviométricos. Os valores acumulados foram de 690 e 769 mm, registrados pelo pluviômetro PL01 e pela estação A555 (INMET – Instituto Nacional de Meteorologia), respectivamente, alguns desses superando o tempo de recorrência de 10 anos para a região indicando vigência do período chuvoso. A evolução da pluviometria na região do dique é apresentada no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Dados de pluviometria: PL01.



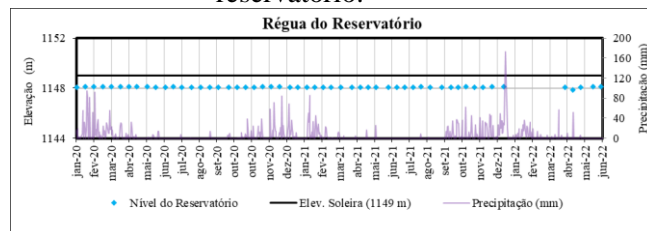
Fonte: A autora, (2022).

Nível de Água do Reservatório

A régua limimétrica é o instrumento utilizado para a leitura do nível d'água do reservatório a ser monitorado. Este nível auxilia na definição da linha piezométrica na extensão da seção de análise da estrutura, além de permitir a determinação do volume armazenado ao longo do tempo.

Durante o período de análise, o instrumento registrou leitura máxima na elevação de 1.148,13 m em março de 2020, conforme Gráfico 2. Entre janeiro de 2020 e dezembro de 2021 o nível do reservatório manteve a elevação na ordem de 1.148,10 m. Em janeiro de 2022 não foram realizadas leituras, pois, conforme observado nas inspeções de campo, o instrumento estava assoreado devido aos escorregamentos que ocorreram nas encostas do dique durante o período chuvoso. No mês de abril de 2022 a régua foi reinstalada e voltaram a ser realizados registros do nível do reservatório. Entre abril e junho de 2022 a leitura máxima indicou a El. 1148,10 m.

Gráfico 2 - Leituras da régua limimétrica do reservatório.



Fonte: A autora, (2022).

O nível do reservatório permaneceu estável e abaixo da cota da soleira do extravasor (1.149,00 m, valor apresentado no cadastro do instrumento) durante todo o período analisado. O fato do nível d'água no reservatório não sofrer variação devido à contribuição da vazão de percolação do entorno da barragem e por haver uma limpeza periódica do conteúdo do reservatório que, portanto, mantém o nível constante.

Percolação

Segundo Costa (2012), os piezômetros são instrumentos de auscultação com propósito de medir as pressões neutra nos maciços de terra e nas rochas, além das subpressões atuantes na interface com as obras de concreto. Cruz (1996) aponta que os indicadores de nível d'água (INA) diferem do piezômetros em termos construtivos e são utilizados para definir a cota da linha freática nos maciços de terra e rocha.

Os piezômetros instalados no dique de contenção são do tipo Casagrande e consistem em um tubo vertical ligado a um elemento poroso para monitoramento das poropressões no nível de cota de instalação do elemento poroso. Este instrumento apresenta como vantagens a facilidade construtiva, o baixo custo e a experiência na utilização, porém manifestam desvantagens como tempo de resposta elevado e os problemas durante alteamentos. Os INAs são tubos de PVC de diâmetro 3/4" perfurados ao longo do

comprimento, com tampão na extremidade inferior.

A Tabela 1 e Tabela 2 apresentam o resumo das informações de instalação e os níveis de controle dos indicadores de nível d'água e dos piezômetros operantes no dique, respectivamente. A razão pela qual alguns instrumentos não apresentam níveis de controle está associada a profundidade e/ou data de instalação deste.

Tabela 1 - Dados de instalação dos PZs e INAs.

Instrumento	Cota de Topo (m)	Cota de Fundo (m)	Prof. (m)
PZ 01	1151,82	1141,05	10,77
PZ 02	1151,82	1143,03	8,79
PZ 03	1151,80	1140,45	11,35
PZ 04	1151,80	1142,55	9,25
PZ 05	1152,04	1141,58	10,46
PZ 06	1152,04	1138,95	13,09
PZ 07	1151,74	1141,89	9,85
PZ 08	1152,11	1137,05	15,06
PZ 09	1152,06	1141,96	10,10
PZ 10	1151,74	1144,49	7,25
PZ 11	1146,76	1136,31	10,45
PZ 12	1146,74	1139,27	7,47
PZ 13	1146,20	1135,92	10,28
PZ 14	1146,30	1136,43	9,87
PZ 15	1146,45	1136,61	9,84
PZ 16	1146,30	1138,00	8,30
INA 01	1151,82	1147,07	4,75
INA 02	1151,80	1146,55	5,25
INA 03	1146,30	1142,84	3,46

Fonte: Adaptado de TPF, 2022.

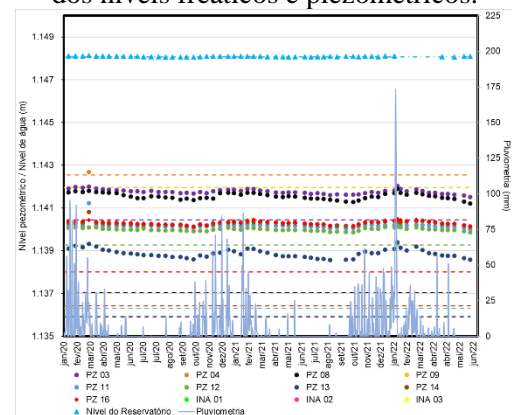
Tabela 2 - Níveis de controle dos PZs e INAs.

Instrum.	Nível de Atenção (m)	Nível de Alerta (m)	Nível de Emergência (m)
PZ 01	-	-	-
PZ 02	-	-	-
PZ 03	1143,03	1150,21	1150,43
PZ 04	1143,03	1150,21	1150,43
PZ 05	-	-	-
PZ 06	-	-	-
PZ 07	-	-	-
PZ 08	-	-	-
PZ 09	-	-	-
PZ 10	-	-	-
PZ 11	-	-	-
PZ 12	-	-	-
PZ 13	-	-	-
PZ 14	1140,82	1144,13	1146,30
PZ 15	-	-	-
PZ 16	1140,82	1144,13	1146,30
INA 01	-	-	-
INA 02	1150,20	1150,21	1150,43
INA 03	1144,12	1144,13	1146,30

Fonte: Adaptado de TPF, 2022.

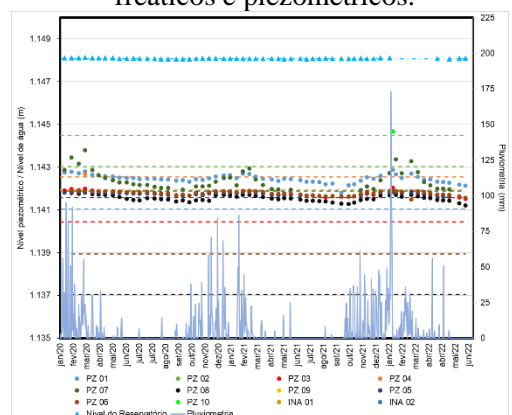
Para análise da percolação, foram elaborados os Gráfico 3 e Gráfico 4 que exibem os dados de leituras, no período de referência, dos INAs e PZs da seção transversal A-A' e da seção longitudinal B-B', respectivamente; conjuntamente com a precipitação e nível de reservatório correspondente. Conforme apresentado nos gráficos, observa-se que os instrumentos, de maneira geral, indicam baixas oscilações, sendo coerente com o nível do reservatório. Nesses gráficos, cada instrumento é identificado por uma cor diferente, sendo que as linhas tracejadas representam as cotas de fundo dos instrumentos, e os pontos indicam as elevações de leitura. Destaca-se que as leituras do nível do reservatório estão representadas por triângulos, bem como a cota de fundo da régua limnimétrica está indicada pela linha de traço-ponto.

Gráfico 3 – Seção transversal A-A' - Histórico dos níveis freáticos e piezométricos.



Fonte: A autora, (2022).

Gráfico 4 – Seção B-B' - Histórico dos níveis freáticos e piezométricos.



Fonte: A autora, (2022).

Analisando o histórico de leituras é possível observar que entre dezembro e fevereiro dos anos de 2020 e 2021 os instrumentos PZ01, PZ03, PZ 05, PZ 06, PZ 07, PZ 08, PZ 11, PZ 12, PZ 13 e PZ 15 apresentaram uma tendência de elevação nas leituras, o que demonstra sensibilidade destes instrumentos com o período chuvoso. Nestes mesmos anos (2020 e 2021), entre março e agosto foi possível observar a tendência de redução no nível piezométrico condizente com o período de seca. O comportamento dos PZs e INAs é função da precipitação, profundidade do instrumento e características geológica-geotécnicas do material que este está inserido

Os piezômetros PZ 05 PZ 06, PZ 08 e PZ 09 estão localizados na crista do barramento. O PZ 05 apresenta em seu histórico de medições leituras próximas à cota de fundo do instrumento (média 20 cm acima). Já o instrumento PZ 09 não apresenta leituras na maioria de seu histórico de medições. Os instrumentos PZ 06 e PZ 08 apresentaram históricos de medição com pouca variação entre as leituras. No primeiro semestre de 2022, o instrumento PZ 09 não apresentou leitura e os instrumentos PZ 05, PZ 06 e PZ 08 exibiram leituras máximas de 1141,85 m, 1141,92 m e 1141,89 m, respectivamente.

Os piezômetros PZ 01, PZ 02, PZ 07 e PZ 10 estão localizados nas regiões das ombreiras do dique. Os PZ 01 e PZ 02 são instrumentos localizados na mesma coordenada apresentando profundidades diferentes, sendo estas de 10,77 m e 8,79 m respectivamente. O instrumento PZ 02 é um instrumento considerado seco, ou seja, apresenta leituras iguais a cota de fundo do instrumento em todo período analisado. De forma análoga, os PZ 07 e PZ 10 estão localizados na mesma coordenada apresentando profundidades diferentes, sendo estas profundidades de 9,85 m e 7,25 m respectivamente. O PZ 07 e PZ 10 apresentam comportamento sazonal e predominantemente seco, respectivamente. No mês de janeiro de 2022, os instrumentos

PZ 01 e PZ 07 apresentaram leituras máximas nas elevações 1142,88 m e 1144,68 m, respectivamente. Destaca-se que no 1º semestre de 2022, o instrumento PZ07 apresentou variação de 2,79 m entre a leitura máxima (El.1144,68 m), em janeiro, e a mínima, em junho (El. 1141,89 m). Além disso, o instrumento PZ 10 que até então apresentava comportamento seco em todo seu histórico, apresentou leitura na El. 1144,67 m em janeiro de 2022.

Os PZ 03 e PZ 04 localizados na crista do Dique III estão localizados na mesma coordenada com profundidades diferentes, sendo estas 11,35 m e 9,25 m, respectivamente. No período entre janeiro e junho de 2022, o instrumento PZ 04 se encontrou em condições secas. Enquanto o PZ 03 apresentou leitura máxima na El. 1142,04 m, em janeiro, e mínima na El. 1141,52 m em junho; indicando uma redução de 0,52 m no nível piezômetro.

Os piezômetros PZ 11 e PZ 12 localizados na berma de reforço do dique apresentaram pequenas oscilações em seu histórico de leituras, considerando períodos chuvosos e secos. As leituras máximas dos instrumentos PZ 11 e PZ 12, ocorreram em janeiro de 2022, nas elevações 1140,22 m e 1140,13 m, respectivamente.

Os instrumentos PZ 14 e PZ 16, estão localizados na berma de reforço na mesma coordenada e nas profundidades 9,87 m e 8,30 m, respectivamente. No período em análise esses instrumentos apresentaram poucas oscilações e aproximando-se do nível de atenção, porém sem ultrapassá-lo. No primeiro semestre de 2022, o PZ 14 e PZ 16 registraram leituras máximas em janeiro, nas elevações 1140,39 m e 1140,48 m, respectivamente, e a variação máxima no nível piezométrico foi na ordem de 0,30 m para ambos os instrumentos.

O PZ 13 e o PZ 15 localizados no pé do dique indicaram oscilações coerentes com os períodos de chuva e períodos secos. Entre janeiro e junho de 2022 os instrumentos PZ 13 e PZ 15 registraram leituras máximas nas elevações 1139,39 m

e 1140,09 m respectivamente. Além disso, observou-se que entre o período citado houve uma redução no nível piezométrico de 0,80 m para o PZ 13 e 1,98 m para o PZ 15.

Os indicadores de nível d'água INA 01, INA 02 e INA 03, se mantiveram secos durante todo o período analisado, em função da profundidade e local de instalação.

Analisando as informações da instrumentação apresentada anteriormente, conclui-se que esta apresentou comportamento condizente ao longo do histórico e abaixo dos níveis de controle. Em janeiro de 2022, a maioria dos instrumentos indicaram elevação máxima histórica, decorrente das elevadas precipitações que ocorreram. A oscilação das leituras nos instrumentos condiz e se justifica com o regime pluviométrico que, por sua vez, influencia o nível d'água no reservatório e subterrâneo.

Medidor de Vazão

A medição da vazão pode ser realizada através em drenos da fundação ou em canaletas de galerias de drenagem e objetivam a determinação das vazões percoladas no maciço (CRUZ, 1996). Os medidores de vazões podem indicar obstrução dos drenos (quando houver diminuição nos vazamentos), erosão interna e aumento da poropressão a partir da análise das características da água de percolação (FONSECA, 2003).

O dique em estudo não possui medidor de vazão direta de drenagem interna instalado a jusante da estrutura. Existe um medidor de vazão localizado a jusante da galeria de drenagem, que possibilita a medição da vazão da drenagem interna de forma indireta, pela diferença entre a vazão deste medidor e a vazão vertida do extravasor. Porém, ainda não houve medições desse instrumento.

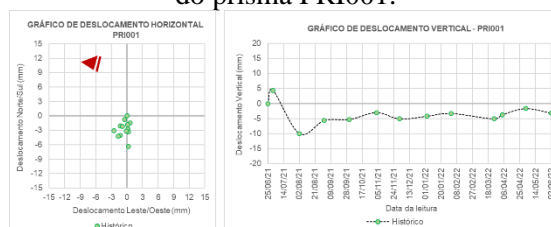
Deslocamentos

Os recalques e deslocamentos horizontais ao longo das bermas e da crista do barramento podem ser medidos através dos prismas de deslocamentos. Silveira (2006) explica que as medições dos deslocamentos são executadas a partir de um referencial fixo, localizado na região das ombreiras, através de estações topográficas. Dunnicliff (1988), por sua vez, expõe que há diferença entre os referenciais fixos para medição de deslocamento horizontal e recalque, sendo estes denominados *reference monument* e *benchmark*, respectivamente.

O dique em estudo conta com 3 prismas para monitoramento de deslocamentos do maciço, localizados na crista do barramento. A direção montante-jusante do maciço é indicada no Gráfico 5, Gráfico 6 e Gráfico 7 por uma seta vermelha. Nesses gráficos também são apresentados os deslocamentos horizontais e verticais da estrutura registrados no período de junho de 2021, mês no qual foi adotado um novo referencial, a junho de 2022.

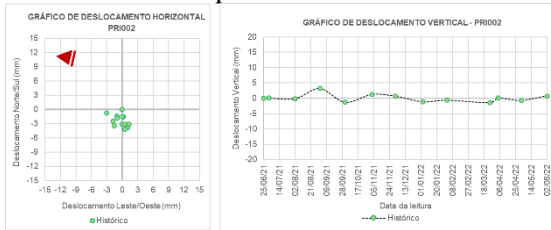
De acordo com Costa (2012), a frequência de medições dos deslocamentos no corpo da barragem diminui ao longo da vida útil do empreendimento. Para a estrutura em análise, a frequência de leitura é mensal.

Gráfico 5 - Deslocamento horizontal e vertical do prisma PRI001.



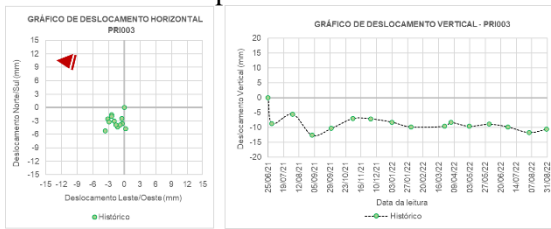
Fonte: A autora, (2022).

Gráfico 6 - Deslocamento horizontal e vertical do prisma PRI02.



Fonte: A autora, (2022).

Gráfico 7 - Deslocamento horizontal e vertical do prisma PRI03.



Fonte: A autora, (2022).

No período de análise, nota-se que os prismas PRI01, PRI02 e PRI03 registraram deslocamentos verticais máximos de apenas 10 mm; 1,4 mm e 12,6 mm, para baixo (recalque), respectivamente. Esses valores correspondem, no máximo, a 0,10% da altura do dique. Neste período, os deslocamentos horizontais máximos apresentados nos três prismas se encontram na ordem de 4 a 7 mm, nas direções S/SO. Verifica-se que há retorno de parte dos deslocamentos, indicando um caráter cíclico e temporário. Os deslocamentos cíclicos podem ser reflexos de mudanças de temperatura, precisão dos instrumentos, entre outros fatores.

Destaca-se que os prismas PRI01 e PRI02, no mês de agosto de 2021, e o PRI03, no mês de setembro de 2021, apresentaram recalque máximo. A pluviometria desses meses indicou período de seca, portanto o recalque pode estar associado ao adensamento do solo do maciço, que condiz com a redução do nível piezométrico observado nos piezômetros.

Avaliação do Sistema de Drenagem Interna

Com base nas investigações geológicas e geotécnicas realizadas na

estrutura, o dique dispõe de dreno de fundo de espessura média de 1,30 m e máxima de 1,70 m, constituído de areia fina a média com pedregulhos, medianamente compacta a compacta. Além disso, de acordo com as sondagens a trado realizadas na crista do dique foi identificado o filtro vertical, caracterizado como areia média siltosa, marrom. As sondagens a trado, que foram executadas na metade do talude de jusante identificaram o tapete drenante do dique, caracterizado como areia média siltosa, cinza.

Na inspeção de campo, realizada no dia 14 de junho de 2022, não foram constatados pontos de umidade ou surgências na extensão dos taludes e paramentos ou no entorno do dreno de pé da estrutura. Observou-se também, que o fluxo de drenagem interna se apresentava limpo e isento de carreamento de sólidos.

Durante o período avaliado, os indicadores de nível d'água (INA 01, INA02, INA 03) e os piezômetros (PZ 02, PZ 04, PZ 09 e PZ 10) se apresentaram secos. Além disso, todos os instrumentos se encontram abaixo dos níveis de atenção, permitindo apoiar o funcionamento adequado observado na inspeção de campo.

As avaliações realizadas, baseadas na inspeção de campo e nas leituras da instrumentação indicaram que o sistema de drenagem interna do maciço tem funcionamento normal, porém, como explícito anteriormente, não foram realizadas leituras da vazão interna do maciço.

Análise de Estabilidade

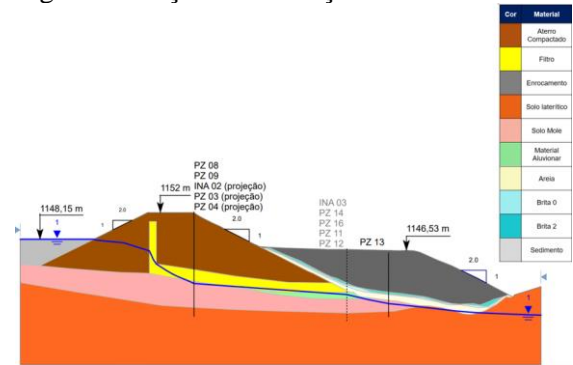
A seção crítica para a avaliação da estabilidade foi denominada seção A-A', e foi definida como tal por se tratar da seção de maior altura. A seção A-A' é indicada na Figura 2 e os parâmetros de resistência adotados para os materiais são indicados na Tabela 3. Os parâmetros dos materiais foram obtidos mediante interpretação de ensaios laboratoriais e de sondagens realizados na região da estrutura e no

entorno, correlações com SPT e referência bibliográfica.

Nesse trabalho, são apresentados os cálculos de estabilidade, para os três cenários mencionados na Tabela 4 e detalhados a seguir:

- Cenário I (operação com rede de fluxo em condição normal) – a linha piezométrica foi definida com base nas leituras médias dos piezômetros (PZs) e nível do reservatório foi considerado na cota da soleira (1148,15 m), definida por levantamento topográfico;
- Cenário II (operação com rede de fluxo em condição extrema) – para a linha piezométrica foram adotadas as leituras do dia em que foram registradas as leituras máximas dos instrumentos para todo o histórico analisado e o nível do reservatório foi adotado na elevação máx. maximorum (El. 1.150,35 m) para TR de 1.000 anos;
- Cenário III (solicitação sísmica, com nível máximo do reservatório) – a linha piezométrica foi definida com base nas leituras médias históricas dos piezômetros (PZs) e nível do reservatório foi considerado na cota da soleira (1148,15 m). Nesse cenário, considerou-se uma solicitação sísmica com aceleração horizontal igual a 0,0219g, e vertical igual a 0,0146g, em consequência do tempo de vida útil da estrutura, 25 anos, com probabilidade de excedência do sismo de ~10%, e tempo de retorno de 250 anos, tratando-se de uma estrutura com dano potencial associado MÉDIO.

Figura 2 - Seção A-A': Seção crítica.



Fonte: A autora, (2022).

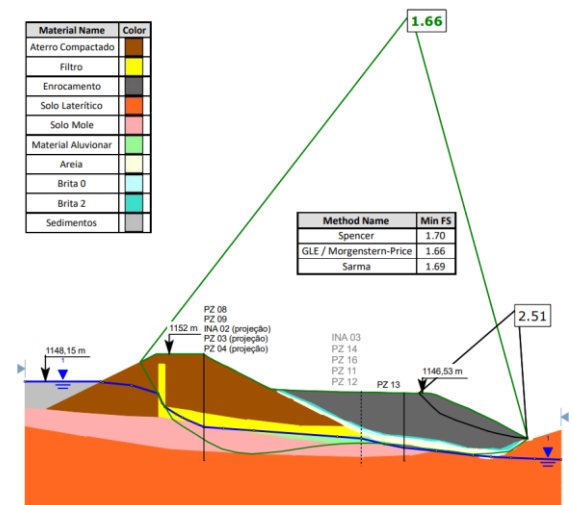
Tabela 3 - Seção A-A': Seção crítica.

Material	ρ (kN/m ³)	ρ_{sat} (kN/m ³)	c' (kPa)	Φ (°)	Su/ σ'_{vo}
Aterro Compact.	19,5	-	11	35	-
Filtro	20	-	0	30	-
Enrocam.	22	-	0	45	-
Solo Laterítico	15,5	17,5	20	24	-
Solo Mole	15	17	-	-	0,17
Material Aluvionar	20	-	23	25	-
Areia	20	-	0	30	-
Brita 0	22	-	0	35	-
Brita 2	22	-	0	36	-
Sedimento	18	-	-	-	0,21

Fonte: Adaptado de TPF, 2022.

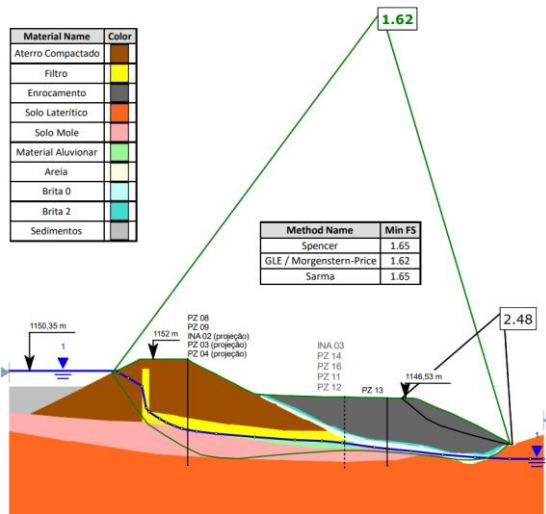
As Figura 3, Figura 4 e Figura 5 indicam os fatores de segurança para os cenários I, II e III, respectivamente.

Figura 3 - Cenário I - Operação em condição normal.



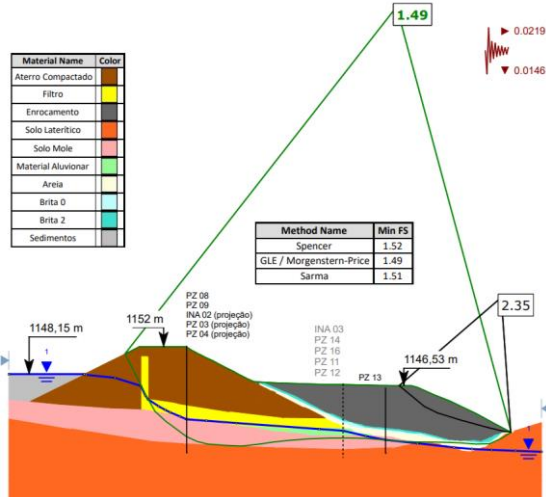
Fonte: A autora, (2022).

Figura 4 - Cenário II - Operação em condição extrema.



Fonte: A autora, (2022).

Figura 5 - Cenário III - Solicitação sísmica com nível normal do reservatório.



Fonte: A autora, (2022).

Para os cenários de estabilidade definidos foram selecionadas superfícies de ruptura referentes aos menores valores dos FS obtidos pelos métodos utilizados para os cálculos (Sarma, Spencer e GLE/Morgenstern-Price). A Tabela 4 apresenta um resumo dos resultados obtidos nos cálculos de estabilidade apresentados neste trabalho, indicando que os FS obtidos atendem aos valores mínimos requeridos.

Tabela 4 - Fatores de Segurança para a seção A-A', localizada no trecho central.

Cenário	Descrição	FS _{drenado}		FS mínimo NBR 13.028/2017
		Análise		
		Global	Berma de Reforço	
I	Condição de "operação normal"	1,66	2,51	1,5
II	Condição extrema	1,62	2,48	1,3
III	Solicitação sísmica	1,49	2,35	1,1

Fonte: A autora, (2022).

Ressalta-se que, a partir das informações de características geológica-geotécnicas dos materiais existentes, os materiais do maciço apresentaram um comportamento predominante dilatante, para o qual não se aplica o cálculo de estabilidade não drenado. As informações referentes a camada de argila mole na fundação são limitadas e não permitem uma avaliação detalhada do comportamento desse material. Contudo, foi considerado para o solo mole comportamento não drenado para as análises realizadas.

CLASSIFICAÇÃO DA BARRAGEM CONFORME LEGISLAÇÃO

A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), estabelecida pela Lei nº 12.334/2010, define em parágrafo único do art. 1º que as barragens devem apresentar, pelo menos, uma das seguintes características para serem abrangidas na PNSB. O dique de contenção em estudo atende ao critério IV.

- I. Altura do maciço, medida do encontro do pé do talude de jusante com o nível do solo até a crista de coroamento do barramento, maior ou igual a 15 (quinze) metros;
- II. Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³ (três milhões de metros cúbicos);

- III. Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
- IV. Categoria de dano potencial associado, médio ou alto, conforme definido no inciso XVI do artigo 2º e no Anexo IV;
- V. Categoria de risco alto, conforme definido no inciso XI do artigo 2º, §1º do art. 5º e Anexo IV da Resolução ANM nº 95/2022.

A PNSB contempla, entre seus instrumentos, o sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH).

As barragens de mineração, por sua vez, serão classificadas pela Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022 (legislação que consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração), em conformidade com o art. 7º da Lei nº 12.334/2010, quanto a Categoria de Risco e ao Dano Potencial Associado em alto, médio ou baixo.

A classificação da Categoria de Risco (CRI) é definida de acordo com os aspectos que possam influenciar na possibilidade de ocorrência de acidente ou desastre, considerando-se as características técnicas, o método construtivo, o estado de conservação, a idade do empreendimento e atendimento ao PSB.

A classificação do Dano Potencial Associado (DPA), por sua vez, é definida de acordo com o volume do reservatório, com a existência de população à jusante e com o impacto ambiental e socioeconômico, no caso de rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem.

A classificação quanto à Categoria de Risco e ao Dano Potencial Associado são apresentados, respectivamente, no Quadro 1 e Quadro 2.

Quadro 1 - Classificação quanto à Categoria de Risco (CRI).

1	CATEGORIA DE RISCO (CRI)	PONTOS
1.1	Características Técnicas (CT)	25
1.2	Estado de Conservação (EC)	4
1.3	Plano de Segurança de Barragens (PS)	0
PONTUAÇÃO (CRI) = (CT+EC+PS)		29
CLASSIFICAÇÃO DE RISCO		BAIXO
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	CATEGORIA DE RISCO	CRI
	ALTO	≥80 ou EC = 10 (*)
	MÉDIO	40 < CRI < 80
	BAIXO	≤40

(*) Pontuação (10) em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade de providências imediatas pelo responsável pela barragem

Fonte: Adaptado de ANM (2022).

Quadro 2 - Classificação quanto ao Dano Potencial Associado (DPA).

CLASSIFICAÇÃO PARA BARRAGENS DE MINERAÇÃO		
2	DANO DE POTENCIAL ASSOCIADO	PONTOS
2.1.	Volume total do reservatório	1
2.2.	Existência de População a Jusante	3
2.3.	Impacto Ambiental	6
2.4	Impacto Socioeconômico	1
PONTUAÇÃO (DPA)		11
CLASSIFICAÇÃO DE DANO		MÉDIO
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	DANO DE POTENCIAL ASSOCIADO	DPA
	ALTO	≥13
	MÉDIO	7 < DPA < 13
	BAIXO	≤7
MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO		MÉDIO

Fonte: Adaptado de ANM (2022).

A classificação do dique de contenção em relação à Categoria de Risco (CRI) é Baixo e em relação ao Dano Potencial Associado é Média. Cabe ressaltar a classificação da estrutura é dinâmica, ou seja, pode e deve ser alterada de acordo com a atualização da legislação, as revisões dos documentos de referências e variação no comportamento da estrutura.

Quadro 3 - Classificação quanto à Categoria de Risco (Resíduos e Rejeitos) – Características Técnicas (CT)

1.1 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS – CT									
ALTURA (a)	INCLINAÇÃO MÉDIA DOS TALUDES NA SEÇÃO PRINCIPAL (b)	COMPRIMENTO (c)	VAZÃO DE PROJETO (d)	CONTROLE DE COMPACTAÇÃO (e)	EXISTÊNCIA DE DRENAGEM INTERNA (f)	FUNDAÇÃO (g)	MÉTODO CONSTRUTIVO (h)	INSTRUMENTAÇÃO (i)	IDADE DA BARRAGEM (j)
Altura ≤ 15m (0)	Intermediário (1V:2H ≥ Inclinação > 1V:3H) (3)	50m < Comprimento < 200m (1)	CMP (Cheia Máxima Provável) ou Decamile nar (0)	Não houve controle tecnológico e/ou não há informação e/ou compactação em desacordo com projeto (10)	Drenagem construída conforme projeto ou não existe drenagem em projeto (0)	Fundação desconhecida/ Estudo não confiável (10)	Etapa única (0)	Existe instrumentação de acordo com o projeto técnico (0)	Entre 5 e 15 anos (1)
CT = S (a até j) = 25									

Fonte: Adaptado de ANM (2022).

Quadro 4 - Classificação quanto à Categoria de Risco (Resíduos e Rejeitos) – Estado de Conservação (EC).

1.2 – ESTADO DE CONSERVAÇÃO (EC)				
CONFIABILIDADE DAS ESTRUTURAS EXTRAVASORAS (k)	PERCOLAÇÃO (l)	DEFORMAÇÕES E RECALQUES (m)	DETERIORAÇÃO DOS TALUDES / PARAMENTOS (n)	DRENAGEM SUPERFICIAL (o)
Estruturas civis bem mantidas e em operação normal / barragem sem necessidade de estruturas extravasoras (0)	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)	Não existem deformações e recalques com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (0)	Não existe deterioração de taludes e paramentos (0)	Existência de trincas e/ou assoreamento e/ou abatimentos sem medidas corretivas em implantação (4)
EC = S (k até o) = 4				

Fonte: Adaptado de ANM (2022).

Quadro 5 - Classificação quanto à Categoria de Risco (Resíduos e Rejeitos) – Plano de Segurança da Barragem (PS).

1.3 – PLANO DE SEGURANÇA DA BARRAGEM (PS)				
DOCUMENTAÇÃO DE PROJETO (p)	ESTRUTURA ORGANIZACIONAL E QUALIFICAÇÃO DOS PROFISSIONAIS NA EQUIPE DE SEGURANÇA DA BARRAGEM (q)	MANUAIS DE PROCEDIMENTOS PARA INSPEÇÕES DE SEGURANÇA E MONITORAMENTO (r)	PLANO DE AÇÃO EMERGENCIAL - PAE (QUANDO EXIGIDO PELO ÓRGÃO FISCALIZADOR) (s)	RELATÓRIOS DE INSPEÇÃO E MONITORAMENTO DA INSTRUMENTAÇÃO E DE ANÁLISE DE SEGURANÇA (t)
Projeto executivo e "como construído" (0)	Possui unidade administrativa com profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem ou é barragem não enquadrada nos incisos I, II, III ou IV, parágrafo único do art.1º da Lei nº 12.334/2010 (0)	Possui manuais de procedimentos para inspeção, monitoramento e operação ou é barragem não enquadrada nos incisos I, II, III ou IV, parágrafo único do art.1º da Lei nº 12.334/2010 (0)	Possui PAE (0)	Emite regularmente relatórios de inspeção e monitoramento com base na instrumentação e de Análise de Segurança ou é barragem não enquadrada nos incisos I, II, III ou IV, parágrafo único do art.1º da Lei nº 12.334/2010 (0)
PS = S (p até t) = 0				

Fonte: Adaptado de ANM (2022).

Quadro 6 - Classificação quanto ao Dano Potencial Associado – DPA (resíduos e rejeitos).

CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO – DPA			
VOLUME TOTAL DO RESERVATÓRIO (a)	EXISTÊNCIA DE POPULAÇÃO A JUSANTE (b)	IMPACTO AMBIENTAL (c)	IMPACTO SOCIOECONÔMICO (d)
MUITO PEQUENO ≤ 500 mil m³ (1)	POUCO FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (3)	SIGNIFICATIVO (área afetada a jusante da barragem apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos Classe II B – Inertes, segundo a NBR 10.004 da ABNT) (6)	BAIXO (existe pequena concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância socioeconômica cultural na área afetada a jusante da barragem) (1)
DPA = S (a até d) = 11			

Fonte: Adaptado de ANM (2022).

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

No âmbito das análises geotécnicas, o maciço das barragens de mineração precisa ser avaliado quanto à sua estabilidade física frente a solicitações de carregamento drenado e não drenado e solicitações sísmicas. O presente trabalho realizou as verificações, aplicáveis a barragem de mineração em estudo, previstas na norma ABNT NBR 13.028/2017. A partir da avaliação das informações coletadas na inspeção técnica de campo, dos dados de instrumentação geotécnica interpretados e da estabilidade física da barragem, concluiu-se que, no período analisado, a estrutura apresentava condições geotécnicas aceitáveis, além de fatores de segurança satisfatórios quando comparados com os valores mínimos requeridos pela norma.

Em relação a classificação conforme os critérios da Resolução ANM nº 95/2022, o dique de contenção é classificado em relação à Categoria de Risco (CRI) é Baixo e em relação ao Dano Potencial Associado (DPA) é Médio. Dessa forma, deve atender os requisitos estabelecidos na resolução supracitada para tal classificação, a fim de garantir a segurança durante a vida, além de evitar multas e penalizações diante dos órgãos fiscalizadores.

Ademais, é importante enfatizar a importância de se avaliar, continuamente, a segurança das barragens de mineração, com base em análises de estabilidade atualizadas e representativas da situação atual de cada estrutura, e da implementação efetiva e célere de medidas de correção de anomalias identificadas impedindo, portanto, a ocorrência de desastres que ocasionam em impactos sociais, ambientais e econômicos.

As barragens são obras de engenharia com uma complexidade técnica muito elevada, afinal envolve a interdisciplinaridade em todas as etapas de vida útil; construção, operação e descomissionamento. Por essa razão, sugere-se, para trabalhos futuros, a modelagem hidrológica de trânsito de

cheias, a verificação da borda livre, da segurança hidráulica do sistema extravasor e da drenagem superficial da estrutura, que são indispensáveis para propiciar avaliação de segurança de barragens. Ademais, o monitoramento ambiental é um tópico pertinente a barragens de mineração, uma vez que tais estruturas apresentam um potencial de impacto, a depender das características do material armazenado no reservatório, sobre a qualidade de efluentes, águas superficiais e subterrâneas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Relatório de segurança de barragens 2021**. Brasília, DF: ANA, 2022. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2021/rsb-2021.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2022

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022**: consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Brasília, DF: ANM, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13.028**: mineração: elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

BRASIL. Lei n.º 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Redação da lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 189, p. 3, 1 out. ISSN 1677-7042.

CAPUTO, Homero P.; CAPUTO, Armando N. **Mecânica dos Solos**: Obras de Terra e

Fundações. Grupo GEN, 2022. E-book. ISBN 9788521638018. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521638018/>. Acesso em: 30 mar. 2022.

CHIOSSI, Nivaldo José. **Geologia de engenharia**. 3. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

COMISSÃO MUNDIAL DE BARRAGENS. **Barragens e Desenvolvimento: um novo modelo para tomada de decisões – O Relatório da Comissão Mundial de Barragens**. Earthscan, Londres, 2000.

COSTA, Walter Duarte. **Geologia de Barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CRUZ, Paulo Teixeira da. **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

DUNNICLIFF, J. **Geotechnical instrumentation for monitoring field performance**. In: Measurement of total stress in soil, New York: Wiley-Interscience, 1988.

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**. Ouro Preto: UFOP, 2003. Disponível em: <https://www.propec.ufop.br/download-tese/63/auscultacao-por-instrumentacao-de-barragens-de-terra-e-enrocamento-para-geracao-de-energia-eletrica-estudo-de-caso-das-barragens-da-uhe-sao-simao>. Acesso em: 20 jul. 2022.

MACHADO, William Gladstone de Freitas. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração**. São Paulo, 2007. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-31032008-154124/publico/DissertacaoWillianGladstoneMachado.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2022.

MACIEL FILHO, Carlos Leite; NUMMER, Andrea Valli. **Introdução à geologia de engenharia**. 5. ed. rev. e ampl. Santa Maria: Ed. Da UFSM, 2014.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. The analysis of the stability of general slip surfaces. **Geotechnique**, nº 15 v. 1, p. 79-93, 1965. Disponível em: <https://era.library.ualberta.ca/items/14b23206-b500-4025-9132-e250eb0b1d8f/view/fec7db9e-d5a3-4273-b4ba-43a0656768c2/The-20analysis-20of-20the-20stability-20of-20general-20slip-20surfaces.PDF>. Acesso em: 20 jun. 2022.

PEREIRA, João Marcelino Lacerda. **Análise sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens com ênfase nos critérios de monitoramento/instrumentação**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2021. Disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/26071/1/GP_COECI_2021_1_15.pdf. Acesso em: 15 jul. 2022.

SARMA, S. K. Stability analysis of embankments and slopes. **Journal of the Geotechnical engineering Divison, ASCE**, 105, GT12, p. 1511-1524, 1979.

SILVEIRA, João Francisco Alves. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SPENCER, E. A Method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slices forces. **Geotechnique**, nº 17, p.11-26, 1967. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/190215559/A-Method-of-Analysis-of-the-Stability-of-Embankments-Assuming-Parallel-Inter-slice-Forces#>. Acesso em: 10 jul. 2022.

WHA, C.K. **Aplicabilidade dos eletrônicos na instrumentação geotécnica**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro,

1999. Disponível em:
http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/biblioteca/php/mostratese.php?arqtese=1999-WHA_C_K.pdf.
Acesso em: 25 mar. 2022.

AGRADECIMENTOS

A autora agradece a todos que participaram, direta ou indiretamente, do desenvolvimento deste trabalho, enriquecendo o processo de aprendizado, e em particular:

A Deus pela vida e por me dar fé e esperança, em quantidade tal, para que eu conseguisse alcançar essa conquista.

Ao meu pai, Jailson, e a minha mãe, Eliana, pelo amor incondicional, dedicação e força.

Aos meus irmãos, Emerson e Daniel, pela amizade e incentivo nos momentos difíceis.

Ao meu orientador, Dr. André Borgatto, pela confiança depositada na minha proposta, apoio técnico, palavras de incentivo e por sempre estar presente para indicar a direção correta.

A TPF Engenharia, empresa que atua com Engenharia de Registro (EdR) na estrutura, pelo fornecimento dos dados necessários para a pesquisa.

Aos amigos adquiridos ao longo da graduação pelo companheirismo e cooperação mútua durante estes anos.