

Avaliação do Sistema de Monitoramento ETR e GNSS de uma ECJ-CCR

Afrânio Costa Pereira

Engenheiro Geólogo, VALE, Belo Horizonte – MG, Brasil, afranio.pereira@vale.com

Letícia Martins Lopes

Engenheira de Minas, HEXAGON, Belo Horizonte – MG, Brasil, leticia.lopes@hexagon.com

Eduardo José Diniz

Engenheiro de Minas, HEXAGON, Belo Horizonte – MG, Brasil, eduardo.diniz@hexagon.com,

Iara Fernandes Moreira

Engenheira de Minas, CSN Mineração, Congonhas - MG, Brasil, iarafernandesmoreira@hotmail.com

Marcio Fernandes Leão

Geólogo-Geotécnico, Tractebel, Belo Horizonte - MG, Brasil, marciotriton@hotmail.com

RESUMO: Uma Estrutura de Contenção de Jusante (ECJ) é construída a jusante de uma barragem de mineração ou empilhamento drenado com disposição hidráulica de rejeitos suscetíveis à liquefação. O sistema de monitoramento de uma ECJ é definido seguindo as características técnicas, o arcabouço local no qual está inserido e a legislação vigente. Assim, o objetivo do artigo foi a avaliação comparativa do sistema e da qualidade dos dados do sistema de monitoramento por Estação Total Robótica (ETR) e do Global Navigation Satellite System ou Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) para uma ECJ. Devido ao fato da instalação dos equipamentos serem muito próximas, foi realizada análise comparativa entre a movimentação apresentada pela ETR e a movimentação apresentada pela Base do GNSS a fim de encontrar uma possível correlação. Apesar dos problemas de referência presentes nas leituras do prisma de referência e das interrupções de leituras nos prismas de monitoramento, os dados analisados apresentaram sinergia e coerência entre si, indicando qualidade dos mesmos, além da estabilidade da estrutura. Assim, ambos os métodos se mostraram eficientes e a utilização entre um e outro deve ser avaliada para cada estrutura, porém sem redundância.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento, ECJ, ETR, GNSS, Barragem.

ABSTRACT: A Back-up Dam (BD) is constructed downstream of a mining dam or drained piling with hydraulic disposal of tailings susceptible to liquefaction. The monitoring system of a BD is defined by observing the technical characteristics, the local framework in which it is included and the current legislation. Thus, the objective of the article was the comparative evaluation of the system and data quality of the Robotic Total Station (RTS) monitoring system and the Global Navigation Satellite System or Global Satellite Navigation System (GNSS) for an BD. Due to the fact that the equipment was installed very close together, a comparative analysis was carried out between the movement delivered by RTS and the movement delivered by the GNSS Base in order to find a possible demonstration. Despite the reference problems presented in the reference prism readings and the interruptions in readings in the monitoring prisms, the analyzed data showed synergy and coherence between them, a drop in their quality, in addition to the stability of the structure. Thus, both methods proved to be efficient and the use of one over the other must be evaluated for each structure, but without redundancy.

KEYWORDS: Monitoring, Back-up Dam, RTS, GNSS, Dam.

1 INTRODUÇÃO

Uma Estrutura de Contenção de Jusante (ECJ) é uma estrutura construída a jusante de uma barragem de mineração ou empilhamento drenado com disposição hidráulica de rejeitos e suscetíveis à liquefação, com o objetivo de reter os efluentes desta no evento de ruptura ou funcionamento inadequado (ANM, 2022). Por esta razão, a sua avaliação de performance, avaliada por instrumentação e inspeção, por meio de vigilância é fundamental para garantir a segurança da barragem caso esta venha ser submetida. Destaca-se que as solicitações de cargas a essa estrutura ocorrem apenas caso a estrutura a montante rompa e desta forma todo o material será represado pela ECJ.

O sistema de monitoramento de uma ECJ é definido seguindo as características técnicas, o arcabouço local no qual está inserido e a legislação vigente (MACHADO, 2007). Estruturas de grandes magnitudes e que apresentam considerável nível de complexidade na fundação além do seu método construtivo, exigem uma rede de monitoramento robusta, capaz garantir o correto funcionamento plano de segurança de barragem. Ou seja, um sistema de monitoramento que busque ao máximo eliminar os pontos.

A ECJ (Figura 1), objeto deste trabalho aqui denominada ECJ-CCR, é uma barragem de gravidade constituída de concreto compactado a rolo (CCR) e revestida de concreto convencional com um conjunto de quatro galerias quadradas de 2,5 m x 2,5 m, como estrutura de desvio. A altura máxima da estrutura é de 40,0 m e o comprimento de crista é de 327,0 m. A inclinação do talude global (jusante e montante) é de 1,0V:0,56H.

Este trabalho visa apresentar uma avaliação do sistema e da qualidade dos dados do sistema de monitoramento por Estação Total Robótica (ETR) e do *Global Navigation Satellite System* ou Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) para avaliação dos deslocamentos da ECJ (Figura 1) de uma mina paralizada (mineração de ferro) no Estado de Minas Gerais.



Figura 1. Visão geral da ECJ-CCR. Visada aérea de montante para jusante.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, foram definidos os equipamentos que fariam o monitoramento da ECJA. ETR é um equipamento topográfico que realiza leitura de prismas topográficos (de referência de monitoramento) de maneira automatizada, sem a interferência humana. O sistema GNSS baseia-se em medir quanto tempo o sinal leva para chegar de um satélite para o receptor e determinar sua posição no planeta.

Os modelos de equipamentos em operação na ECJ-CCR são da fabricante Leica *Geosystems*. A ETR é o modelo TM-60 e o sistema GNSS é composto pela base modelo GR10 e antena rover modelo GMX910.

O tratamento dos dados dos referidos sistemas foi realizado utilizando o software Leica *GeoMoS Now*, também desenvolvido pela Leica *Geosystems*.

Ao longo da estrutura estão instalados 14 prismas de monitoramento modelo GPR112 e, na parte externa à ECJ, foram instalados 3 prismas de referência GPR121. Ambos os modelos fabricados pela Leica Geosystem. A antena ou receptor Rover do sistema GNSS encontra-se instalada na crista da ECJ-CCR e a sua Base junto à ETR na praça de monitoramento geodésico. O sistema GNSS utiliza-se do aplicativo Spider para integração dos dados entre a Base e o Receptor *Rover*.

Para a avaliação do sistema de ETR foram definidas cinco sessões de prismas para identificação de tendência de deslocamento na estrutura. A Figura 2(a) apresenta a imagem de satélite indicando a localização

dos prismas de monitoramento na ECJ e da antena rover ou GNSS-Rover. Nesta também está indicado as locações das sessões de análise utilizadas neste trabalho.



Figura 2. Em (a), localização dos prismas de monitoramento da ETR, sessões de análise e antena rover da GNSS da ECJ-CCR. Em (b), Geometria da rede geodésica para monitoramento por ETR da ECJ-CCR.

Na Figura 2(b) apresenta-se a configuração de rede geodésica pelos prismas de referência do sistema de monitoramento da ETR. A geometria angular indica ângulos de abertura de aproximadamente 40° e 70° , suficiente para a redução da elipse de erros e evitando-se colinearidade entre as linhas de cruzamento Prismas Referências/ETR/ Prismas Referências. Foram utilizados dados adquiridos pela ETR entre os dias 24 de março de 2022 e 6 de dezembro de 2022. Os dados do sistema GNSS foram adquiridos entre os dias 23 de setembro e 6 de dezembro de 2022.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Avaliação Geral do Sistema ETR

O sistema de ETR da ECJ-CCR atualmente está configurado para operar com o método de orientação Free Station (interseção de ré), o qual calcula a posição tridimensional da ETR e sua orientação em função da posição dos prismas de referência e das leituras de distâncias e ângulos.

O cálculo pelo método de orientação Free Station permite acompanhar a estabilidade do pilar da ETR. De acordo com a configuração do equipamento, o mínimo de pontos válidos para aceite do cálculo de orientação está configurado em três pontos de referência. Isto significa que, se por alguma razão, o equipamento não conseguir realizar a leitura em um dos pontos referenciais, não é realizada a orientação, mantendo o valor antigo e garantindo a estabilidade no cálculo da posição da ETR. Contudo, a ausência da correção da orientação referência pode gerar acúmulo de imprecisões às leituras ao longo do tempo.

No diagnóstico, foi realizada a avaliação da orientação, por meio da confecção de um gráfico de Orientação e das coordenadas de cadastro de cada prisma constituinte do sistema. Para o prisma de referência 3, nesse trabalho denominado REF-03, o gráfico de orientação mostrou-se com leituras zeradas devido à ausência de atualização de coordenada referência. Foi verificado que durante a instalação da ETR, o prisma REF03 se encontrava obstruído por vegetação e não pôde ser lido, impedindo, dessa maneira, que suas coordenadas fossem atualizadas. Por consequência, os dados vetoriais tais como 2D, Easting e Northing não foram utilizados na presente avaliação por não terem sido submetidos à devida correção de orientação do sistema, acarretando um acúmulo de imprecisões às leituras. A análise foi feita a partir dos dados brutos de distância inclinada e deslocamento em cota que é calculado independentemente do ângulo horizontal (Hz) corrigido.

Na avaliação da estabilidade do equipamento foram confeccionados dois gráficos de movimentação, o Longitudinal (Longitudinal Tilt) e o Transversal (Transversal Tilt), indicando a tendência de inclinação do equipamento. O gráfico de Longitudinal Tilt da ETR indica uma suave tendência à movimentação (inclinação) de aproximadamente $0^\circ 00' 50''$ no período analisado. A partir de outubro de 2022, apresentou uma tendência

de estabilização. O gráfico de Transversal Tilt apresenta saltos, que dificultaram definir uma clara tendência de movimentação ao longo de todo período avaliado. Contudo, ainda que menos representativo, também é observada uma tendência de estabilização a partir de outubro de 2022 (Figura 3).

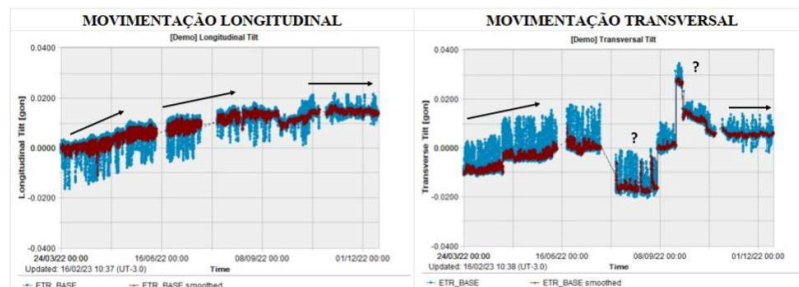


Figura 3. Gráficos de avaliação da estabilidade física da ETR da ECJ-CCR (linhas azuis – dados brutos e linhas vermelhas – dados suavizados) com indicativos de tendência (setas pretas) e intervalos sem possibilidade de definição de tendência (“?”).

3.2 Análise dos Dados de Monitoramento

A análise dos dados de monitoramento do sistema de ETR da ECJ-CCR foi feita a partir da elaboração de gráfico de Dados Vetoriais (2D Vector) e os gráficos de Dados Brutos (*Slope Distance*, *Height* e *V Angle*). O gráfico 2D Vector indica a direção da movimentação dos prismas em planta, no plano XY ou *Northings-Eastings*. O gráfico *Slope Distance* tem o objetivo de apresentar a variação da distância entre a ETR e os prismas. O gráfico *Height* indica a variação ao longo do Eixo Z ou Elevação, ou seja, movimentos de recalque e soerguimentos. Por fim, o gráfico *V Angle* tem o objetivo de avaliar o desvio angular entre a ETR e os prismas, sendo utilizado para calibrar as movimentações indicadas nos outros gráficos.

3.2.1 Gráficos dos Prismas de Referência

Os gráficos de monitoramento dos prismas de referência foram elaborados a partir dos dados dos prismas de referência REF-01, REF-02 e REF-03 (Figura 4). Todas as análises foram realizadas comparando a posição dos prismas em relação à ETR. Nas imagens, as setas pretas indicam tendência do movimento e as linhas verticais verdes indicam interrupção de leituras dos prismas.

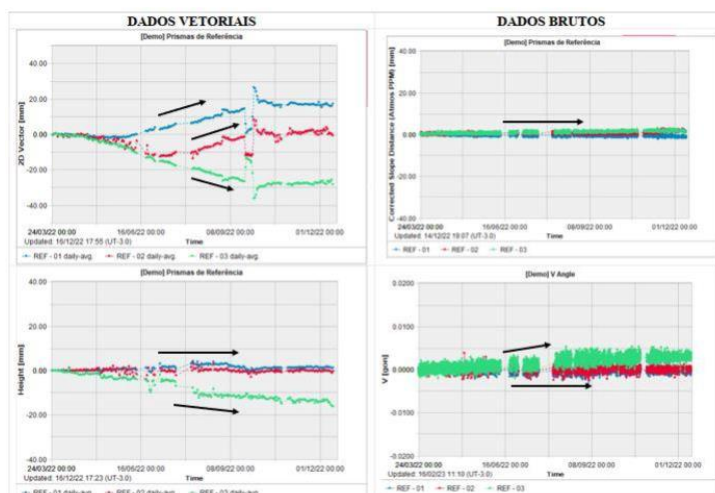


Figura 4. Gráficos de monitoramento dos prismas de referência da ECJ-CCR.

O gráfico *Slope Distance* indica uma tendência de aproximação entre a ETR e o prisma REF-01 e um sensível distanciamento para os prismas REF-02 e REF-03. O prisma REF-02 apresentou um pequeno salto de 1,5 mm em distância inclinada na data de 16/11/22. Os dados de *Height* e *V Angle* demonstram tendência de recalque do prisma REF-03 de aproximadamente 15,0 mm e estabilidade dos prismas REF-01 e

REF-02. As informações vetoriais 2D não passaram por correção por orientação do sistema e, portanto, as variações observadas são acúmulos de imprecisão do sistema.

Os prismas de monitoramento foram agrupados em seções de AA' à EE' (Figura 5), além dos prismas de referência, para melhor apresentação dos resultados. Todas as análises foram realizadas comparando a posição dos prismas em relação à ETR.



Figura 5. Gráficos de monitoramento dos prismas de monitoramento da Seção AA' (a), BB' (b), CC' (c), DD' (d) e EE' (e), da ECJ-CCR

Os gráficos de monitoramento da Seção AA' (Figura 5a) foram elaborados a partir dos dados dos prismas de monitoramento PR-13 e PR-14. Para a Seção BB' (Figura 5b) foram utilizados os prismas PR-10, PR-11 e PR-12. Para a Seção CC' (Figura 5c) foram utilizados os prismas PR-07, PR-08 e PR-09. Para a Seção

DD' (Figura 5d) foram utilizados os prismas PR-04, PR-05 e PR-06. Por fim, para a Seção EE' (Figura 5e) foram utilizados os prismas PR-01, PR-01 e PR-03. As informações vetoriais 2D não passaram por correção por orientação do sistema e, portanto, as variações observadas são acúmulos de imprecisão do sistema.

Para a Seção AA' foi detectada uma interrupção em definitivo da leituras do primas de monitoramento PR-13 a partir do dia 11 de junho de 2022. O gráfico *Slope Distance* indica uma tendência de aproximação entre a ETR e o prisma PR-14. Os dados de *Height* e *V Angle* demonstram estabilidade em cota do prisma PR-14.

Para esta Seção BB' foi detectada uma interrupção das leituras do prisma de monitoramento PR-10 no dia 11 de junho de 2022 e o retorno das leituras em 23 de setembro de 2022, mas em uma posição diferente da inicial. Essa situação indica que provavelmente o prisma foi submetido a algum impacto em campo o que afetou todo o seu histórico. Contudo, a sua tendência de comportamento permaneceu linear, apesar do aumento de ruído entre uma leitura e outra após a retomada das leituras. O gráfico *Slope Distance* indica uma tendência de redução na distância entre a ETR e os prismas PR-11 e PR-12. Os dados de *Height* e *V Angle* demonstram estabilidade em cota dos prismas PR-11 e PR-12.

Para a Seção CC' o gráfico *Slope Distance* indica uma tendência de redução na distância entre a ETR e os prismas PR-07, PR-08 e PR-09. Os dados de *Height* e *V Angle* demonstram estabilidade em cota dos prismas da Seção CC'.

Para a Seção DD', o gráfico *Slope Distance* indica uma sensível tendência de redução na distância entre a ETR e os prismas PR-04, PR-05 e PR-06. Os dados de *Height* e *V Angle* demonstram estabilidade em cota dos prismas da Seção DD'.

Por fim, para a Seção EE', o gráfico *Slope Distance* indica estabilidade no que se refere às distâncias entre a ETR e os prismas PR-01, PR-02 e PR-03. Os dados de *Height* e *V Angle* demonstram estabilidade em cota dos prismas da Seção EE'.

3.3 Avaliação do Monitoramento por GNSS

O sistema de monitoramento por GNSS (*Global Navigation Satellite System*) na ECJ-CCR funciona pelo método de posicionamento RTK (*Real Time Kinematic ou Tempo Real Cinemático*) e por pós-processamento de dados relativos estáticos a base. Esse sistema consiste em um receptor de sinal de satélites com coordenadas conhecidas chamado BASE, instalado próximo à ETR, e outro receptor ou antena posicionado na crista da ECJ denominado ROVER. Ambos trabalham sincronizados através do aplicativo *Spider*, estando o *Rover* sujeito a interferências de mudanças de posição da Base.

Os dados apresentados nesta Seção abaixo, são informações geradas pelo método relativo estáticos por pós-processamento, devido a maior consistência das informações.

O monitoramento por dados do Sistema GNSS se faz por meio de gráficos das variações das coordenadas nos três eixos, *Northing*, *Easting* e *Height* (Eixo Z) ao longo do tempo do período aqui supracitado. Adicionalmente, para determinar o sentido do deslocamento 2D (plano XY ou *Northing-Easting*) do receptor, elabora-se um gráfico de dispersão.

Os dados do *Rover*, antena instalada na crista da estrutura, indicam estabilidade em cota, porém apresentam variação de aproximadamente 5,0 mm na direção norte e 2,5 mm no sentido oeste ou sentido Negativo, conforme apresentado nos gráficos *Northing* e *Easting* respectivamente. Portanto a análise de dispersão (gráfico Deslocamento 2D) apresenta uma movimentação no sentido noroeste, estando as primeiras leituras (pontos azuis) no eixo zero e as leituras mais recentes (pontos em vermelho) a noroeste das coordenadas iniciais. As variações em norte foram mais acentuadas em setembro e outubro, tendendo à estabilização após novembro. A Figura 6 apresenta os gráficos que subsidiaram esta avaliação. Em azul são as linhas brutas e as linhas vermelhas são as suavizadas que objetivam determinar a melhor identificação das tendências.

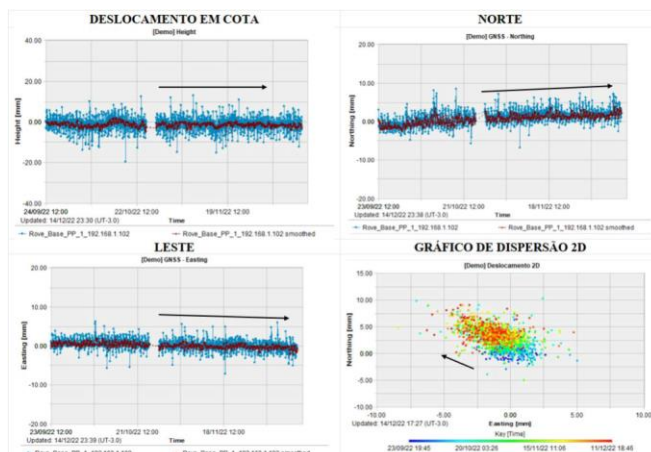


Figura 6. Gráficos de monitoramento da antena *Rover* do sistema GNSS da ECJ-CCR.

3.5 Avaliação do Monitoramento por GNSS

Após a avaliação de ambos os sistemas de monitoramento ficaram incertezas sobre o comportamento de um sistema comparado ao outro. Como exposto nesse trabalho, ambos os equipamentos (ETR e Base do GNSS) estão instalados a poucos metros de distância na mesma praça de monitoramento geodésico, a jusante da ECJ-CCR. Devido a esse fato, foi realizado uma análise comparativa entre a movimentação apresentada pela ETR e a movimentação apresentada pela Base do GNSS a fim de encontrar uma possível correlação entre eles.

A Figura 7 apresenta o gráfico ETR x GNSS no qual a linha em vermelho é a movimentação da base da ETR e em azul tem-se o deslocamento apresentado pelos dados do GNSS (lembrando que o monitoramento por GNSS iniciou-se apenas em setembro/22). Por este gráfico, é possível inferir através do comportamento apresentado pela base da ETR (*Longitudinal Tilt*) coincide com o comportamento do GNSS (*Northing*), incluindo a recente estabilização a partir de outubro/22.

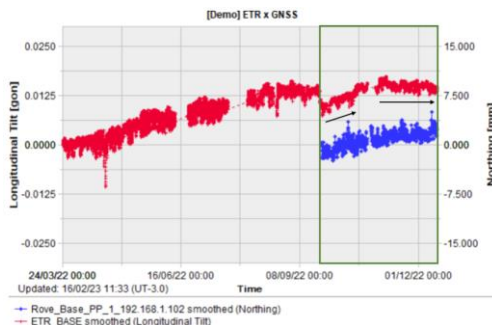


Figura 7. Gráficos de monitoramento da antena *Rover* do sistema GNSS da ECJ-CCR.

A respeito da avaliação geral do sistema ETR, no que refere a estabilidade física do equipamento, a movimentação no sentido longitudinal pode estar relacionada a instabilidade do marco e/ou acomodação do solo onde foi instalado o equipamento.

Em relação aos dados de monitoramento é possível afirmar que a ETR apresentou deslocamento gradativo em sua posição ao longo de todo o período monitorado, tendendo à estabilização a partir de meados de outubro/22. Essa variação é observada nos gráficos de inclinação (*Slope Distance*) da ETR e na redução da distância relativa entre o equipamento e os prismas. Essa condição pode estar relacionada a instabilidade do marco e/ou acomodação do solo onde foi instalado o equipamento. Com exceção do prisma REF-03 que vem passando por um processo de recalque gradativo e do prisma PR-10 que indica ter sido submetido um impacto em campo, os prismas de monitoramento não indicam movimentação da estrutura. As variações gráficas observadas são relativas à instabilidade do próprio sistema.

Sobre o sistema GNSS, as movimentações apresentadas nos dados do GNSS podem ser originárias de deslocamento da estrutura em que o Rover está instalado ou movimentação da Base do GNSS que repassa o deslocamento para os dados analisados do Rover.

A partir da avaliação comparativa entre ETR e GNSS (ETR x GNSS) e diante da proximidade entre de instalação dos dois equipamentos (ETR e Base da GNSS), é possível que tenha ocorrido acomodação do solo onde encontra-se a base da praça de monitoramento.

Exposto todas essas condições e comportamentos após a análise dos resultados pode-se descartar movimentação na estrutura, devido ao porte e elevado peso-próprio da ECJ e ausência de tensões atuantes na estrutura. Desta maneira, os sistema de monitoramento geodésico presente na ECJ-CCR indica que o local de implantação da praça de monitoramento passou uma acomodação no solo entre março e outubro de 2022. A partir de então, este local apresenta estabilidade até o final do intervalo de tempo amostral (dezembro de 2022).

Apesar dos problemas de referência presentes nas leituras do prisma de referência REF-03 e das interrupções de leituras nos prismas de monitoramento PR-10 e PR-13 (em definitivo), os dados analisados apresentaram sinergia e coerência entre si, indicando qualidade dos mesmo. Consequentemente, a estrutura encontra-se estável.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A movimentação apresentada em ambos os equipamentos pode indicar a necessidade de um trabalho de ajuste na praça de monitoramento. Para a mitigação da movimentação da Base da GNSS, sugere-se a execução do serviço extra de *crosscheck* que consiste em reprocessamento dos dados da base para identificação de possível instabilidade da antena.

Ainda que exista o indicativo de boa qualidade dos dados e consequentemente do sistema de monitoramento geodésico, se faz necessário, no mínimo, a retomada da leitura do prisma de monitoramento PR-13 e as devidas adequações para que o prisma de referência REF-03 torne um elemento ativo no sistema de monitoramento da ETR. Contudo, a mudança em algumas configurações do sistema trará ainda maior confiabilidade nos dados apresentados, auxiliando assim na tomada de decisões a partir das informações do monitoramento.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos times Vale (Geotecnia de Minas Paralisadas Sudeste e Implantação de Obras de Descaracterização de Barragens) e ao time Hexagon que contribuíram na confecção deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Mineração (2022). Resolução nº 95. *Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração*. Brasília, DF.
- Machado, W. G. F. (2007) *Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos da Mineração*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 155 p.