

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/51

Descaracterização De Barragem Alteada À Montante Com A Implementação De Rebaixamento Dos Níveis Freáticos

Vanessa Luiza Thums

Engenheira Civil, VALE, Belo Horizonte, Brasil, vanessa.luiza.thums@vale.com

Luísa de Andrade Araújo

Engenheira Civil, DAM Projetos de Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, luisa.araujo@dam.com.br

Rafael Mendonça Carvalhais

Engenheiro Civil, DAM Projetos de Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, rafael.carvalhais@dam.com.br

Victor de Oliveira Dias Rocha

Engenheiro Civil, VALE, Belo Horizonte, Brasil, victor.oliveira.rocha@vale.com

Bruno Henrique Morais D'Angelo

Engenheiro de Minas, VALE, Belo Horizonte, Brasil, bruno.dangelo@vale.com

RESUMO: Após a ruptura da Barragem Fundão (2015) e 1 (2019), a política nacional de segurança de barragens apresentou diversas alterações (Lei nº 14.066/2020), proibindo a construção de novas barragens com alteamentos a montante e exigindo a descaracterização daquelas já construídas por este método construtivo. Neste contexto, a descaracterização de barragens construídas pelo método de montante requer cautela e critérios bem estabelecidos de projeto e controles efetivos na execução, de forma a evitar gatilhos que possam gerar liquefação na estrutura. Este estudo de caso apresenta a metodologia aplicada para a descaracterização de uma barragem alteada a montante, contemplando a escavação do rejeito do reservatório e dos alteamentos da estrutura. O rebaixamento dos níveis freáticos ocorrerá em função das escavações no rejeito, sendo aplicadas metodologias diferentes na praia de rejeitos e no restante do reservatório. As escavações permitem a redução do grau de saturação do rejeito, melhorando sua condição não drenada que é um dos condicionantes para a ocorrência da liquefação estática e, ainda, promove o alívio de tensões de forma controlada. As obras de descaracterização desta estrutura serão executadas em sete fases, tendo sido concluída a Fase 1 em 2023, quando ocorreu o início das atividades. Durante todo o período de execução do projeto e da obra foram avaliados os dados de instrumentação existente e a estabilidade da estrutura, cujos resultados refletem o direcionamento do fluxo para montante, resultando numa melhoria da condição de segurança da barragem.

PALAVRAS-CHAVE: barragem, descaracterização, rejeito, nível d'água, alteamento a montante.

ABSTRACT: After the rupture of the Fundão (2015) and 1 (2019) dams, the national dam safety policy presented some changes (Law nº 14.066/2020) prohibiting the construction of new dams with raised upstream and requiring the decharacterization of those already built by this constructive method. In this context, the decharacterization of dams built using the upstream method requires caution and well-established design criteria and effective controls during execution, to avoid triggers that could generate liquefaction in the structure. This case study presents the methodology applied to the removal of a dam raised upstream, including the excavation of the reservoir tailings and the structure's upstream raising. The lowering of groundwater levels will occur because of excavations in the tailings, with different methodologies being applied on the tailings beach and the rest of the reservoir. Excavations allow the reduction of the degree of saturation of the tailings, improving the undrained condition of tailings which is one of liquefaction condicionate, and promotes stress relief in a controlled manner. The works to decharacterize this structure will be carried out in seven phases, with Phase 1 having been completed in 2023, when the activities has effectively begun. All along the period of execution of the project and work, existing instrumentation data and the stability of the structure were evaluated, the results of which reflect the direction of the flow upstream, resulting in an improvement in the dam's safety condition.

KEYWORDS: dam, decharacterization, tailings, water level, upstream raising.

1 INTRODUÇÃO

Na década de 2010 o Brasil sofreu com dois grandes rompimentos de barragens, sendo Fundão em 2015 e Barragem 1 em 2019, tendo sido liberados um volume elevado de rejeitos no meio ambiente e acarretando na morte de centenas de pessoas. Ambas barragens possuíam o método construtivo de alteamento a montante e tais rompimentos foram ocasionados pela liquefação do rejeito de fundação dos alteamentos. Este fenômeno se dá pela perda de resistência do material, induzida pelo aumento de poropressões, em condição não drenada, típica de solos finos, com baixa coesão, que se apresentem como contrátil e saturados (SILVA, 2010).

Diante destes desastres, a legislação da mineração se tornou mais restritiva, principalmente no estado de Minas Gerais, onde ocorreram os rompimentos mencionados. Em 2019 foi emitida uma resolução conjunta SEMAD/FEAM nº 2.784 que determinou a descaracterização de todas as barragens de contenção de rejeitos e resíduos alteadas pelo método a montante, provenientes de atividades minerárias e localizadas no estado de Minas Gerais. Na sequência, a Agência Nacional de Mineração (ANM) publicou a resolução de nº 13 que estabeleceu medidas regulatórias para assegurar a estabilidade de barragens de mineração e considerações a respeito dos projetos de descaracterização. Em 2020, a Lei nº 12.334/2010 que estabelecia a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), foi alterada pela Lei nº 14.066 que estabeleceu a proibição de barragens com método construtivo alteado a montante por todo o território nacional. Posteriormente, foi publicada a Resolução ANM nº 95/2022, atualizada pela Resolução ANM nº 130/2023, que consolidou os atos normativos acerca da segurança de barragens de mineração no âmbito nacional.

Em 2021 foi realizada uma avaliação ambiental integrada a respeito das obras de descaracterização de barragens alteadas pelo método de montante em Minas Gerais, onde foi identificado que os projetos de descaracterização se classificam em desmonte total, desmonte parcial e sem desmonte da estrutura, sendo desmonte parcial o modelo mais aplicado (NERI, et al. 2021).

Em atendimento às normativas supracitadas, foi desenvolvido um projeto de descaracterização de uma barragem alteada a montante do quadrilátero ferrífero que consiste na escavação e remoção do rejeito do reservatório e dos três alteamentos a montante, permanecendo o Dique de Partida com método construtivo em etapa única. Parte do rejeito reservado pelo Dique de Partida será escavado para que a estrutura permaneça com um volume útil e se torne uma barragem de reservação de água e sedimentos ao final das obras.

O rejeito disposto na barragem é caracterizado como um silte argiloso em estado não compactado (fofo) e saturado, com coeficiente de permeabilidade estimado de $8,05E-05$ cm/s. Conforme a interpretação dos resultados de ensaios triaxiais e CPTUs, este material tem comportamento contrátil ao sofrer cisalhamento em condições não drenadas, ou seja, há geração de poropressões positivas, redução das tensões efetivas e, assim, redução da resistência ao cisalhamento. O nível d'água atual se encontra abaixo da base do 2º alteamento, aproximadamente na elevação 1.291 m, com drenagem interna do Dique de Partida em pleno funcionamento.

Robertson et al. (2019) indica que um depósito saturado ou quase saturado, constituído de solos arenosos ou siltosos muito fofos, ou mesmo de argilas sensíveis, caso submetido a carregamentos não drenados, pode estar sujeito a deslizamento ou fluxo devido à liquefação estática. Dessa forma, o rejeito da estrutura em análise apresenta vários fatores condicionantes para a ocorrência do fenômeno da liquefação estática. A metodologia implementada procurou promover o rebaixamento da superfície freática da estrutura por meio das próprias escavações, realizadas de montante para jusante de forma controlada e dentro das premissas do projeto executivo e, assim, reduzir a saturação do rejeito e, conseqüentemente, as condicionantes para a ocorrência de liquefação estática durante as obras de descaracterização.

2 OBJETIVO

Este artigo tem por objetivo apresentar a metodologia utilizada para o rebaixamento do nível d'água do reservatório de uma barragem alteada a montante, permitindo assim, que as obras de descaracterização sejam executadas com maior segurança para os trabalhadores e, que melhore a condição não drenada do rejeito, controlando uma das principais condicionantes para a ocorrência de liquefação estática.

3 METODOLOGIA

A barragem modelo deste estudo consiste em uma estrutura composta por um Dique de Partida e três alteamentos à montante. Previamente ao início das obras de descaracterização foram implementadas diversas

ações visando a diminuição do aporte de água no barramento. Dentre essas ações, se destacam o esgotamento do lago existente e a execução de canais de cintura para mitigação dos fluxos direcionados para o reservatório. Além disso, foram executadas escavações/regularizações de planos preparatórios para períodos chuvosos, na porção mais a montante do reservatório, que permitiram a condução da contribuição de água superficial para esta região.

O projeto de descaracterização desta estrutura consiste na escavação do rejeito a partir da região mais a montante do reservatório de forma a executar um *sump* de recebimento dos fluxos no ponto mais baixo da escavação. Os taludes projetados possuem inclinação suave, considerando 1V:3H para o rejeito em condição não saturada e 1V:6H para o rejeito em condição saturada. A altura máxima de escavação proposta é de 3 m, com bermas variando de 10 m a 20 m. Todas as bermas possuem declividade suficiente para permitir o direcionamento das águas superficiais para o fundo da escavação. No *sump* haverá um sistema de bombeamento que conduzirá a contribuição de água para os canais de contorno do barramento. A escavação a ser executada na praia de rejeitos, nos 200 m mais próximos ao barramento, deverá ser executada por meio de trincheiras drenantes perpendiculares à crista, com declividade em direção ao *sump* (jusante para montante), a serem executadas no sentido das ombreiras para o centro. Tal metodologia foi implementada com o objetivo de conduzir os fluxos de água para a região de montante, afastando do maciço a possibilidade de recargas da superfície freática.

As obras de descaracterização possuem a premissa de serem executadas apenas nos períodos secos, sendo paralisadas nos períodos chuvosos, enquanto os fatores de segurança das análises para a condição não drenada para resistência residual ou liquefeita não atenderem. Esta premissa foi definida com o objetivo de reduzir o risco associado das atividades e, devido à baixa produtividade nos dias chuvosos. Nos períodos chuvosos são previstas ações mitigadoras, como regularização da drenagem superficial do reservatório, impedindo que se formem poças e fluxos não controlados e, dificulte a recarga do lençol freático da estrutura.

O barramento e o reservatório possuem uma gama de instrumentos para controle do nível d'água e poropressão, por meio de medidores de nível d'água (INA) e piezômetros (PZ), respectivamente. A medida em que a escavação for executada no reservatório e nos alteamentos, os INA's são desativados e os PZ's são rebaixados, permanecendo em pleno funcionamento e monitorando a poropressão no rejeito. Parte da instrumentação é automatizada, com leituras a cada 4 horas, e parte das leituras são manuais, com frequência semanal. Desde o início do projeto, a empresa do Projeto de Descaracterização e a equipe de Geotecnia Operacional da Vale acompanham o monitoramento da instrumentação e, analisam a performance da estrutura com análises de estabilidade semanais, quinzenais e mensais, conforme necessidade. O rejeito desta estrutura apresenta comportamento não drenado com resistência de pico e contrátil e, dessa forma, as análises de monitoramento consideraram parâmetros de resistência em termos de razão de resistência de pico para o rejeito, a partir dos dados obtidos nos ensaios de campo CPTUs.

No período de abril a outubro de 2023 foi executada a Fase 1 deste projeto, contemplando a escavação apenas da região montante do reservatório, mantendo um distanciamento de 200 m do barramento, conforme Figura 1 que apresenta a conformação final da Fase 1. Foram escavados cerca de 1,8Mm³ de rejeito neste ano. Durante todo o período foram realizadas análises de estabilidade mensais da estrutura, considerando a condição não drenada de pico, e o acompanhamento do monitoramento da estrutura.



Figura 1. Configuração final da Fase 1 das obras de descaracterização.

4 RESULTADOS

Visando auxiliar no processo de drenagem do rejeito, foram executadas valas de drenagem e praças de trabalho no reservatório, com inclinação do terreno para a região de montante, onde se situa o *sump* existente com bombeamento. Esta metodologia apresentou resultados efetivos no tratamento das praças para escavação e possibilitou o escoamento da água liberada pela dissipação do rejeito saturado para o *sump* que chegou a bombear até 600 m³/dia no período seco. Além disso, no período chuvoso de 2023/2024 foi possível observar uma boa performance na drenagem do reservatório, sem anomalias e empoçamentos.

A estrutura conta com quatro seções de instrumentação para análise do monitoramento. As Figuras 2 a 5 apresentam os gráficos comparativos da instrumentação e da pluviometria, sendo a nomenclatura das seções na sequência da ombreira direita para a esquerda. Importante informar que no período de abril a outubro de 2022 foram registrados 308 mm acumulados de chuva, enquanto no mesmo intervalo de 2023, foram registrados 387 mm, meses que ocorreram as escavações no reservatório relacionadas com a Fase 1 da descaracterização. Alguns instrumentos foram descomissionados de acordo com o avanço das escavações, como o INA_203_20 e INA_200_20.

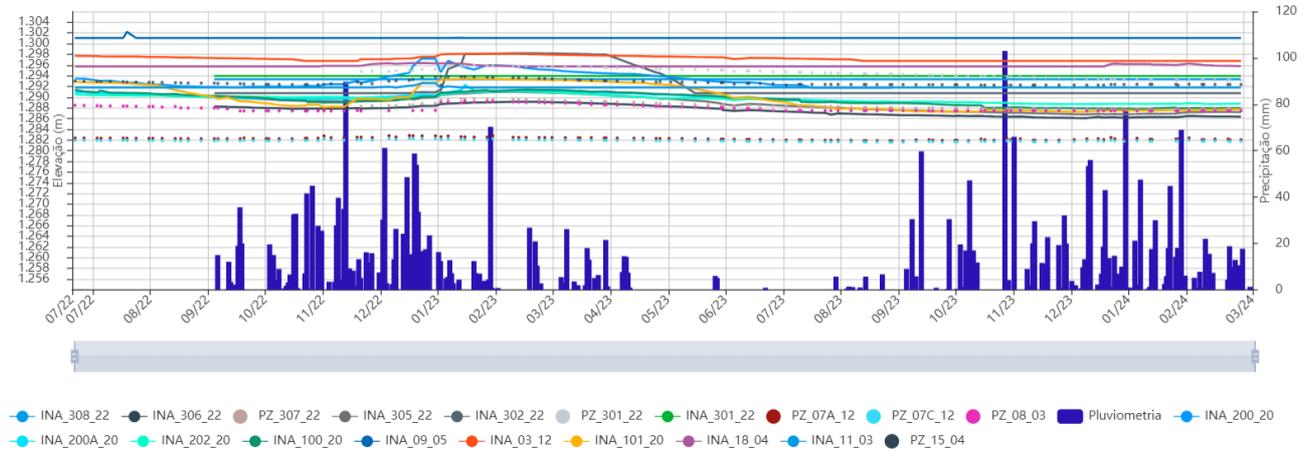


Figura 2. Histórico de leituras da instrumentação da Seção A.

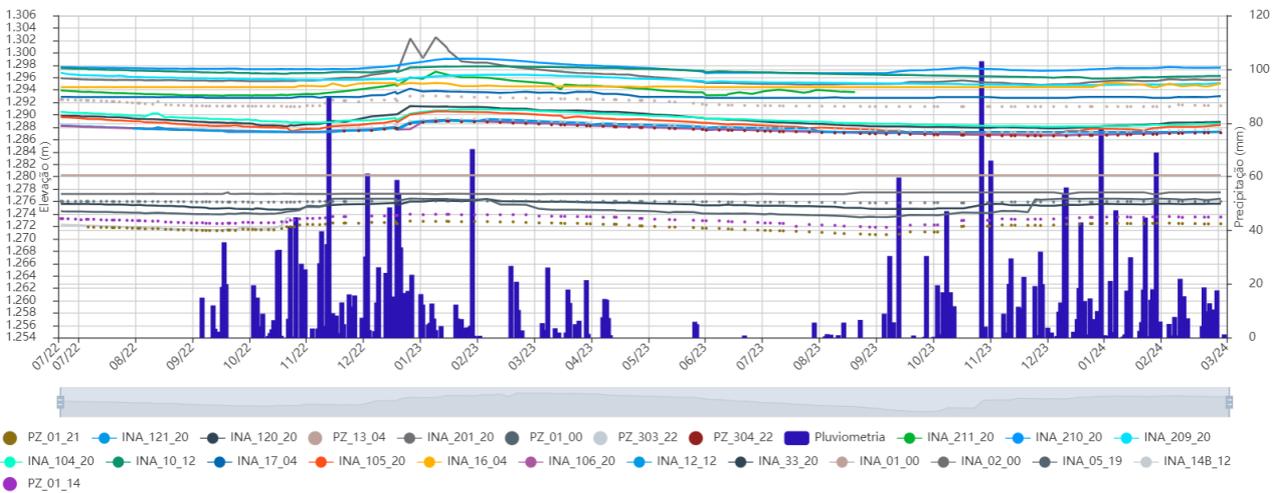


Figura 3. Histórico de leituras da instrumentação da Seção B.

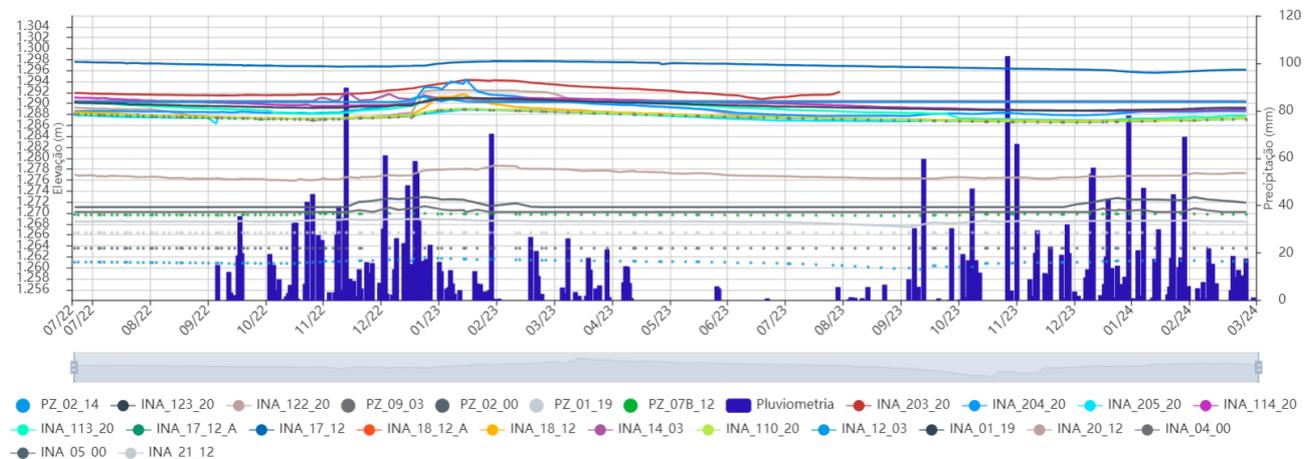


Figura 4. Histórico de leituras da instrumentação da Seção C.



Figura 5. Histórico de leituras da instrumentação da Seção D.

De forma geral, é possível avaliar que alguns instrumentos apresentaram comportamento similar ao ciclo hidrológico anterior, enquanto que a maioria apresentou pouca recarga e alguns mostraram redução das leituras durante o período chuvoso. Os instrumentos das seções A e D foram os que apresentaram maior variação em comparação ao ano de 2022 e 2023. Alguns instrumentos instalados no reservatório não apresentaram recarga em 2023, como o INA_201_20, INA_204_20, INA_202_20 e INA_205_20. Os instrumentos instalados a jusante da estrutura e no Dique de Partida não apresentaram variação significativa em suas leituras entre 2022 e 2023, mostrando um comportamento similar de elevação durante os períodos chuvosos. Instrumentos instalados no 3º (crista da barragem) e 2º alteamentos apresentaram pouca ou nenhuma recarga com a incidência das chuvas, como o INA_302_22, INA_101_20 e o INA_26_12, enquanto que alguns apresentaram um comportamento diferente dos demais ciclos hidrológicos, mostrando redução nas leituras como o INA_303_22, INA_108_20 e INA_25_12.

É importante ressaltar que as escavações executadas em 2023 tiveram sua conformação final na porção de montante do reservatório na elevação 1.293 m, com a base do *sump* na elevação 1.290 m. A expectativa é que, com o avanço das obras e execução das demais fases, o nível freático, inclusive no maciço, continue a rebaixar e, apresentar leituras e recargas menores.

Como análise complementar, podemos avaliar os instrumentos instalados no 2º alteamento, região que o nível freático influencia significativamente no resultado do fator de segurança. A Figura 6 apresenta o gráfico de uma seção longitudinal com os instrumentos instalados na crista do 2º alteamento e, é possível observar que ao comparar os períodos de 2022 e 2023, a instrumentação praticamente não apresentou recarga com a incidência das chuvas, mantendo as leituras estáveis desde o final do período chuvoso de 2022. Destaca-se o INA_101_20 que apresentou diferença de 6 m e, os instrumentos INA_122_20 e INA_26_12 de 4 m, entre as leituras atuais e as do último período chuvoso.

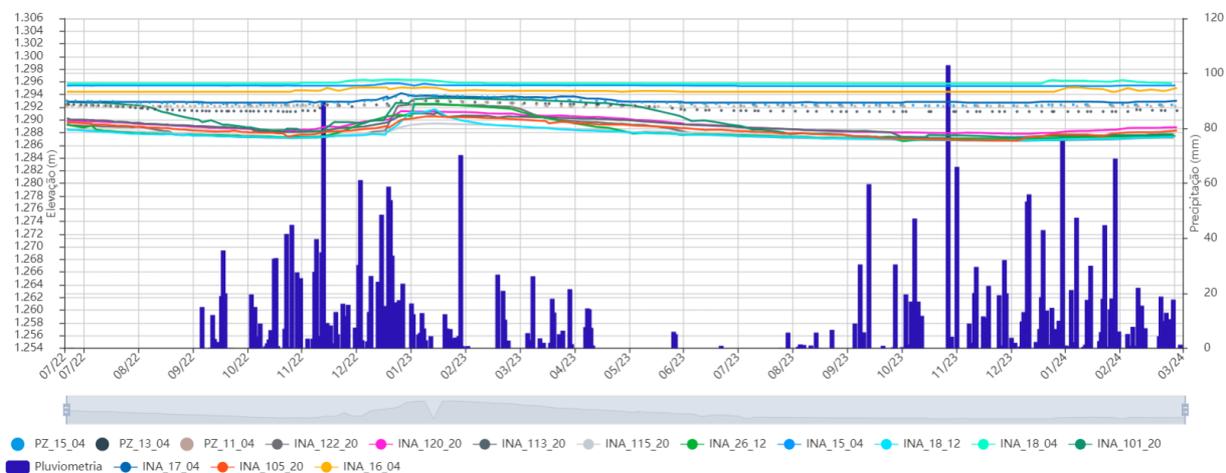


Figura 6. Histórico de leituras dos instrumentos instalados no 2º alteamento.

As seções de instrumentação são coincidentes com as seções de análise da estabilidade da estrutura, sendo os dados de monitoramento base para esta avaliação. A Figura 7 apresenta o gráfico com a evolução dos fatores de segurança (FS) encontrados mensalmente desde 2021 para a análise de condição não drenada para resistência de pico, que é uma das principais referências de condição de estabilidade da estrutura. Os registros pluviométricos são apresentados em barras enquanto que as linhas são os resultados dos FS para cada seção. É possível observar um comportamento diretamente relacionado com a incidência pluviométrica, apresentando menores resultados no período chuvoso e, melhoria da condição de estabilidade no período seco. Isso ocorre em função da variação da superfície freática no interior da estrutura. Ao comparar os resultados de 2022 e 2023 percebe-se que após a implementação das melhorias de controle e direcionamento da drenagem para porção mais montante do reservatório, a estrutura atingiu coeficientes de segurança superiores, mesmo com índices pluviométricos acumulados similares. Destacam-se os resultados para a seção A, que apresentou maiores FS, diretamente relacionado a não recarga de alguns instrumentos no período chuvoso de 2023.

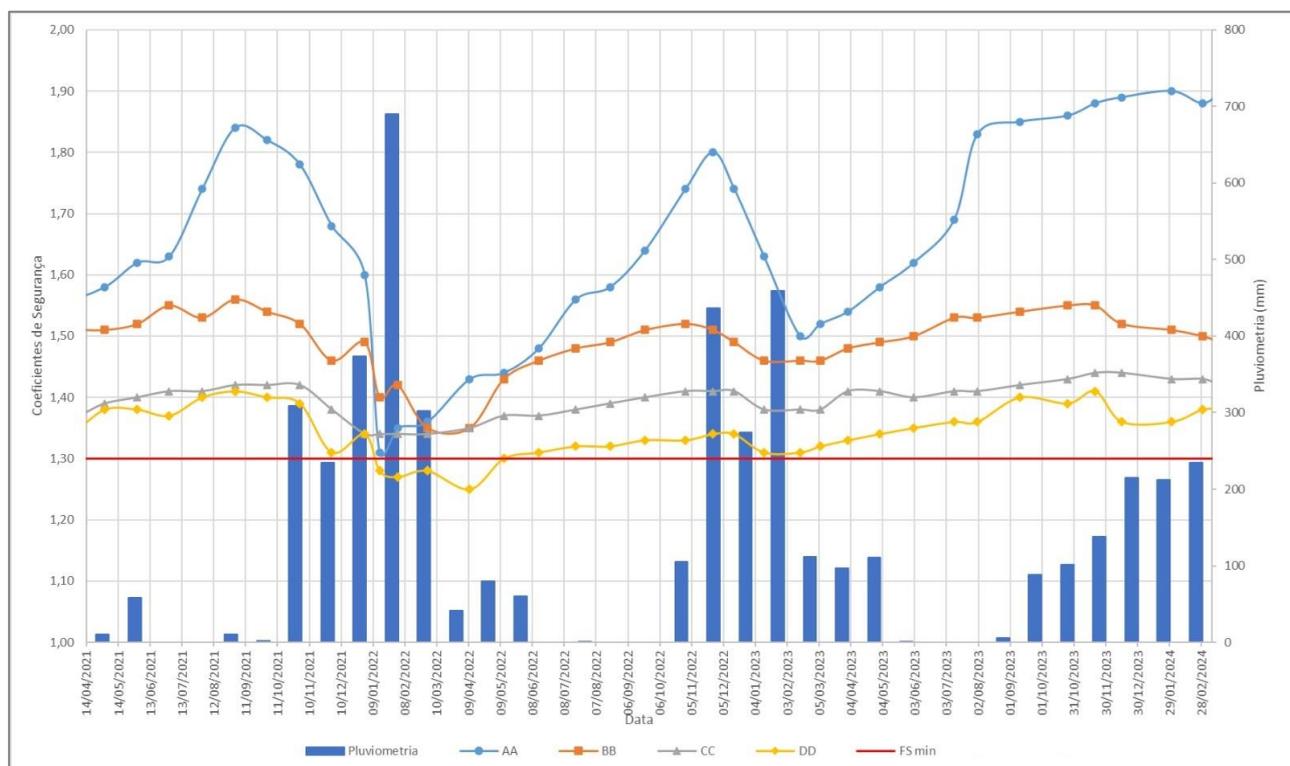


Figura 7. Resultados mensais dos fatores de segurança da estrutura desde 2021.

As Figuras 8 e 9 apresentam os resultados das análises de estabilidade da Seção A da barragem nos meses de novembro/2022 e novembro/2023, respectivamente. É perceptível o rebaixamento do nível d'água na região abaixo do segundo alteamento entre as duas análises, resultando em uma melhoria significativa nos fatores de segurança com incremento de 0,25 e, assim, na condição de estabilidade da estrutura. Em 2022 o nível freático nesta região era aproximadamente na elevação 1.293 m e, em 2023 se encontrava em torno da elevação 1.287 m, conforme avaliação dos dados de monitoramento.

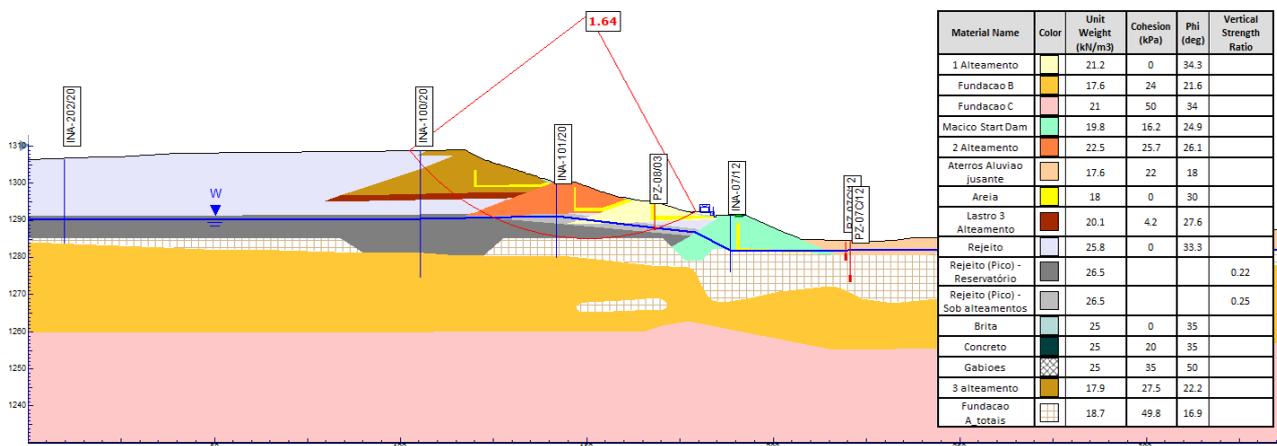


Figura 8. Seção A - Análise de Estabilidade – Condição Não Drenada de Pico – Novembro/2022.

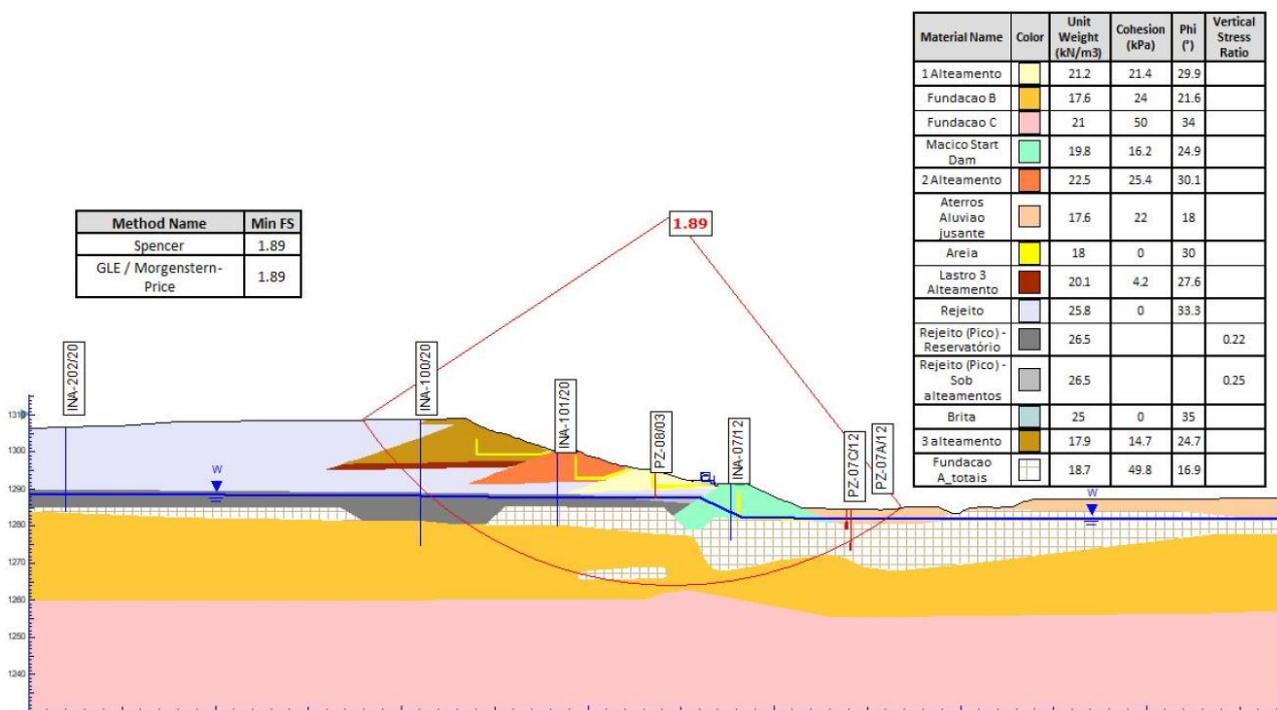


Figura 9. Seção A - Análise de Estabilidade – Condição Não Drenada de Pico – Novembro/2023.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo de caso apresentou a análise de uma barragem alteada a montante do quadrilátero ferrífero que está em processo de descaracterização. As obras de descaracterização serão realizadas com a remoção de parte do reservatório e dos três alteamentos, através de escavações de montante para jusante, com direcionamento do fluxo de água para a região montante do reservatório, onde há um *sump* com bombeamento. No período de abril a outubro de 2023 foi executada a Fase 1 deste projeto, contemplando a escavação apenas da região montante do reservatório, mantendo um distanciamento de 200 m do barramento.

De forma geral, é possível avaliar que alguns instrumentos apresentaram comportamento similar ao ciclo hidrológico anterior, enquanto que a maioria apresentou pouca recarga e alguns mostraram redução das leituras durante o período chuvoso. Os instrumentos das seções A e D, localizadas próximo às ombreiras, foram os que apresentaram maior variação em comparação ao ano de 2022 e 2023. Instrumentos instalados na crista e no 2º alteamento apresentaram pouca ou nenhuma recarga com a incidência pluviométrica, como o INA_302_22, INA_101_20 e o INA_26_12, enquanto que alguns apresentaram um comportamento diferente

dos demais ciclos hidrológicos, mostrando redução nas leituras como o INA_303_22, INA_108_20 e INA_25_12.

Ao avaliar os instrumentos instalados no 2º alteamento, região que o nível freático influencia significativamente no resultado do fator de segurança foi possível observar que ao comparar os períodos de 2022 e 2023, a instrumentação praticamente não apresentou recarga com a incidência das chuvas, mantendo as leituras estáveis desde o final do período chuvoso de 2022. Os dados de monitoramento dos instrumentos foram utilizados como base para as análises de estabilidade, levando a fatores de segurança maiores em 2023, comparados a 2022, incrementando segurança a estrutura.

Com isso, é possível concluir que a metodologia utilizada para a descaracterização desta barragem vem apresentando resultados positivos, tanto na forma de execução e na dissipação da poropressão do rejeito quanto na performance da estrutura, sendo observada evolução da estabilidade ao longo dos meses.

É importante ressaltar que as escavações executadas em 2023 tiveram sua conformação final na porção de montante do reservatório na elevação 1.293 m, com a base do *sump* na elevação 1.290 m. A expectativa é que, com o avanço das obras e execução das demais fases, o nível freático, inclusive no maciço, continue a rebaixar e, apresentar leituras e recargas menores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Lei 12.334. (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.*
- Lei 14.066. (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).*
- Neri, A.C.; Sánchez, L.E.; Alves, C.F.C; Dupin, P.C.; Silva-Sánchez, s.; Baeta, A.m.; Modesto, A.;Christofolletti, C.; Cunha, C.b.; Tanikawa, D.H.; Piló, H.; Yoshida, H.T.; Bessa Jr., J.E.; Bezerra, J.S.B.; Sánchez, J.; Dias, L.g.; Souza, L.T.M.; Santos, M.R.G.; Souza, L.T.M.; Santos, M.R.G.; Borghieri, M.G.; Ferracini, M.; Massignan, R.S.; Monteiro, V.L. (2021) *Avaliação ambiental integrada das obras de descaracterização de barragens alteadas pelo método de montante no estado de Minas Gerais.* São Paulo: Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia. 36p.
- Resolução Conjunta SEMAD/FEAM - MG nº2.784. (2019) *Determina a descaracterização de todas as barragens de contenção de rejeitos e resíduos, alteadas pelo método a montante, proveniente de atividades minerárias, existentes em Minas Gerais e dá outras providencias.*
- Resolução Nº 13 ANM. (2019) *Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado “a montante” ou por método declarado como desconhecido e dá outras providencias.*
- Resolução Nº 95 ANM. (2022) *Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração.*
- Resolução Nº 130 ANM. (2023) *Altera a Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, e dá outras providências.*
- Robertson, P. K.; Melo, L.; Williams, D. J.; Wilson, G. W. Relatório do Painel de Especialistas Sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Córrego do Feijão. Painel de Especialistas, 2019. 77 p.
- Silva, W.P. (2010) *Estudo do potencial de liquefação estática em uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson 2001.* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto / UFOP, 6 p.