

Descaracterização de Barragem Alteada a Montante: Estudo de Caso e Avaliação de Desempenho

Ricardo Cabette Ramos

Engenheiro Geotécnico, VALE S.A., Itabira/MG, Brasil, ricardo.cabette@vale.com

Keitiane Fátima Coimbra

Engenheiro Geotécnico, VALE S.A., Itabira/MG, Brasil, keitiane.coimbra@vale.com

Thatyane Martins Gonçalves

Engenheiro Geotécnico, VALE S.A., Itabira/MG, Brasil, thatyane.goncalves@vale.com

Gustavo Henrique Nogueira

Engenheiro Geotécnico, WALM, Belo Horizonte/MG, Brasil, gustavo.nogueira@walmengenharia.com.br

Frank M. S. Pereira

Engenheiro Geotécnico, VALE S.A., Belo Horizonte/MG, Brasil, frank.pereira@vale.com

RESUMO: Após os acidentes ocorridos na mineração brasileira nos últimos anos, iniciou-se em 2019 a eliminação de barragens alteadas pelo método a montante, conforme exigências dos órgãos reguladores. O processo de descaracterização inclui descomissionamento, estabilização, monitoramento pós-obra e controle hidrológico e hidrogeológico. Este artigo descreve o estudo de caso de um dique construído sobre rejeitos em um sistema de barragens. O estudo para descaracterização desta estrutura envolveu investigações diretas, ensaios de campo e laboratório, revisões de projeto e análise de riscos por entidades independentes, visando um projeto robusto e seguro. A solução aplicada consistiu na escavação parcial do reservatório a montante e aterro da região a jusante, transformando o local em uma praia de rejeitos com baixa declividade e eliminando a função de contenção do dique. Em 2022, a descaracterização foi concluída e, um ano após as obras, análises e inspeções indicaram aumento na segurança em relação ao fenômeno da liquefação. O objetivo deste artigo é descrever o desempenho da solução implementada em uma das primeiras estruturas brasileiras descaracterizadas, levando em consideração sua importância no contexto atual da mineração.

PALAVRAS-CHAVE: Estrutura descaracterizada; Monitoramento pós-obra; Aumento da Segurança.

ABSTRACT: After the accidents that occurred in Brazilian mining in recent years, the elimination of upstream-raised dams began in 2019, as required by regulatory agencies. The de-characterization process includes decommissioning, stabilization, post-work monitoring, and hydrological and hydrogeological control. This article describes a case study of a dike constructed on tailings within a dam system. The de-characterization study of this structure involved direct investigations, field and laboratory tests, project reviews, and risk analysis by independent entities, aiming for a robust and safe project. The implemented solution consisted of partial excavation of the upstream reservoir and backfilling of the downstream region, transforming the site into a low-slope tailings beach and eliminating the dike's containment function. In 2022, the de-characterization was completed, and one year after the works, analyses and inspections indicated increased safety against liquefaction. The objective of this article is to describe the performance of the implemented solution in one of the first de-characterized structures in Brazil, highlighting its importance in the current mining context.

KEYWORDS: De-characterized structure; Post-work monitoring; Increased safety.

1 INTRODUÇÃO

A construção e manutenção de barragens de rejeitos são aspectos cruciais para o desenvolvimento sustentável da indústria mineradora. Durante décadas, diversas abordagens foram empregadas na concepção dessas estruturas, incluindo métodos como elevação a jusante, linha central e montante. No entanto, os trágicos acidentes envolvendo o colapso das barragens de Mariana (2015) e Brumadinho (2019) no Brasil levaram a uma reavaliação das práticas de construção e regulamentação dessas estruturas. Como resultado, proibiu-se a construção de novas barragens construídas pelo método a montante e promulgou-se legislações exigindo a eliminação das existentes que foram construídas seguindo essa metodologia, por meio de um processo conhecido como descaracterização.

A legislação estabelecida pela Agência Nacional de Mineração do Brasil (ANM nº 13/2019) estipula que as estruturas de contenção de rejeitos que cumpram os requisitos da resolução não devem mais receber rejeitos e/ou sedimentos de forma permanente. Além disso, essas estruturas devem passar por um processo meticuloso de desativação, controle hidrológico e hidrogeológico, estabilização e monitoramento.

Diante das lições aprendidas com os desastres recentes, estudos enfatizaram a importância de incluir os mecanismos de liquefação nas análises de estabilidade dessas estruturas (Turan et al., 2022; Silva et al., 2023). A liquefação pode ser desencadeada por eventos sísmicos, vibrações resultantes de atividades humanas ou variações nos níveis de saturação do solo (Zhang et al., 2022).

Em face dos desafios associados à remoção de estruturas construídas sobre rejeitos, a concepção de projetos requer uma abordagem abrangente que inclua uma variedade de avaliações e estudos preliminares antes da implementação. Especial atenção também deve ser dada aos desafios geotécnicos durante as fases de implementação. Este estudo de caso específico examina a remoção de uma dique de contenção, construído em uma praia de rejeitos e classificado como uma estrutura elevada a montante, cuja obra figura entre as primeiras barragens a serem descaracterizadas das trinta que serão eliminadas pela Vale S.A., uma empresa líder do setor minerador.

2 DESCARACTERIZAÇÃO

2.1 Contextualização do projeto

Em atendimento às necessidades anteriormente expostas, foi desenvolvido para a estrutura foco deste estudo um projeto de descaracterização para alcance de todas as condicionantes preconizadas pelas legislações vigentes. O Dique foi construído pelo método a montante em quatro elevações sucessivas até atingir uma altura de 21 m e um comprimento de 606 m, contendo em seu reservatório 8,8 milhões de m³ de rejeito. Importante destacar que previamente ao início das obras de descaracterização, foi construída uma berma de reforço para adequação do Fator de Segurança da estrutura, permitindo assim as ações da descaracterização. O presente tópico aborda questões inerentes ao projeto de descaracterização.

2.1.1 Arranjo Geral e Conceito do Projeto

O projeto de descaracterização foi composto, de maneira geral, por três ações: (i) escavação parcial do reservatório, (ii) conjugado com a execução de um aterro a jusante da estrutura, transformando toda região em uma praia de rejeitos estável. Sobre essa superfície, (iii) foram propostos canais de drenagem compostos por enrocamento e transições, e leiras direcionadoras para auxiliar melhor condução dos fluxos para os dispositivos propostos.

2.1.2 Caracterização Geológico-Geotécnica

Como ponto de partida, foram identificadas 6 campanhas geotécnicas, abrangendo aquelas executadas anteriormente em fases de construção/alteamento, ou mais recentes para atendimento às demandas mais atuais no âmbito do projeto. Essas campanhas abarcaram ensaios de campo e/ou laboratório, desde ensaios CPTu a triaxiais.

Os rejeitos caracterizados a partir dos dados de campo, majoritariamente por meio de ensaios de piezocone, mostraram dois comportamentos típicos do rejeito do local – fino, em camadas superficiais e granular, mais profundos. Essa divisão pode ser observada tanto pelos dados de cravação – q_c , f_s , u_2 , quanto pelas classificações consagradas, como o sistema SBTn (Robertson, 2016).

Como materiais utilizados no aterro a jusante da estrutura foram aplicados os mesmos rejeitos da camada de reforço construída, que estavam dispostos a montante do local, e com caráter estritamente granular. Esse material foi estudado para, após aplicado, apresentar comportamento dilatante sob cisalhamento, eliminando o potencial de liquefação da camada.

O maciço existente da estrutura era composto predominantemente de materiais finos, advindos de solos naturais presentes nas ombreiras da estrutura, tendo sido devidamente compactados no ato de sua construção.

2.1.3 Seções de Análise e Definição do Nível Freático

Foram analisadas 3 seções geológico-geotécnicas ao longo do dique, sendo duas próximas a cada ombreira e a última central. Para definição do nível freático de cada estrutura, foi realizada uma análise sob dois viéses: seção atual e geometria descaracterizada.

Para a seção atual, foram interpretados todos os dados de instrumentação disponíveis – piezômetros e medidores de nível d'água, onde em posse dessas informações, definiu-se a superfície freática de projeto como aquela de comportamento mais crítico historicamente.

Por outro lado, é de amplo conhecimento que, finalizada a descaracterização, haveria um novo comportamento da superfície freática, tendo em vista das questões hidrogeológicas e geomecânicas do local. Para esse cenário, atribui-se como situação crítica a elevação do fundo dos canais periféricos. A Figura 1 representa a definição para uma das seções de projeto, considerando a geometria da estrutura descaracterizada.

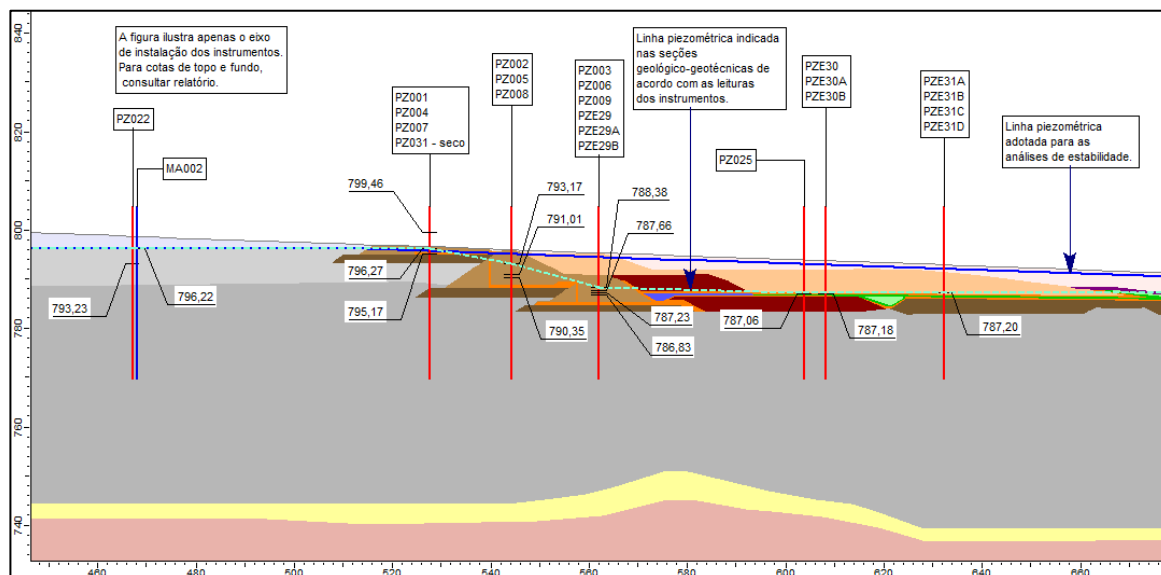


Figura 1. Definição das superfícies freáticas de projeto, seção exemplo.

2.1.4 Diretrizes para Controle, Monitoramento e Paralisação da Obra

Conforme citado anteriormente, as obras foram compostas, majoritariamente, de cortes e aterros, sofrendo grande influência do comportamento dos rejeitos da fundação que foram dispostos hidráulicamente. Desse modo, foi pensada na metodologia necessária para segurança das ações, para acompanhamento durante e pós-obra. Somado aos instrumentos existentes, foi proposta uma malha suficientemente robusta, de modo a viabilizar o monitorar em tempo real de toda a área de influência das intervenções.

Como resultado, as ações de obra foram acompanhadas por meio de uma malha de piezômetros (de Corda Vibrante e Casagrande) e geofones de superfície. Com exceção dos geofones, que foram removidos após concluídas as obras, foram mantidos instrumentos para monitoramento pós-obra, com foco em avaliar o desempenho das estruturas. A Tabela 1 apresenta a frequência de leitura realizada.

Tabela 1. Frequência de leitura dos instrumentos.

Instrumento	Até 15 dias após término da obra	Entre 15 e 45 dias após o término da obra	Após 45 dias do término da obra
Piezômetros de Corda Vibrante	Tempo real	A cada 1 hora	A cada 1 hora
Piezômetros Casagrande	2 vezes por dia	Diário	Semanal
Geofones de superfície	Tempo real	-	-

Foram definidos limites seguros para realização das obras, que limitavam as vibrações a 5 mm/s e os acréscimos abruptos (em período inferior à 24 horas) de poropressão em 5 kPa. Nesses cenários as obras eram paralisadas como um todo. O aspecto observacional também foi considerado como critério, configurando-se como suspensão de obra a evidência de patologias visuais, tais como *sand boils*, trincas, etc.

3 ASPECTOS LEGAIS REQUERIDOS X DESEMPENHO DAS OBRAS

Em obediência à normativa vigente, a descaracterização da estrutura foco deste estudo foi finalizada em novembro de 2022, conforme exigido pela resolução nº 13/2019 da ANM. Essa regulamentação estipula que empreendedores com barragens construídas ou alteadas pelo método a montante devem elaborar um projeto executivo de descaracterização e avançar com as obras após conclusão das intervenções de estabilização, quando necessário. Em complementação a este requisito, o projeto de descaracterização da estrutura deve ser elaborado em consonância com o "Termo de Referência para Descaracterização de Barragens Alteadas pelo Método de Montante", conforme estabelecido pela Resolução Conjunta SEMAD/FEAM nº 2.784 de 21 de março de 2019, em conformidade com a Lei 23.291, de 25 de fevereiro de 2019, que institui a Política Estadual de Segurança de Barragem em Minas Gerais.

A estrutura, foco desse estudo, teve o encerramento de sua operação anteriormente ao sancionamento da Portaria 70.389/2017 em 2019, momento em que o seu reservatório já encontrava-se assoreado. Dessa forma, o descomissionamento procedeu com a desativação da infraestrutura relacionada à sua operação. A Figura 2 mostra a evolução e o processo de assoreamento do reservatório da estrutura após encerramento das suas atividades.

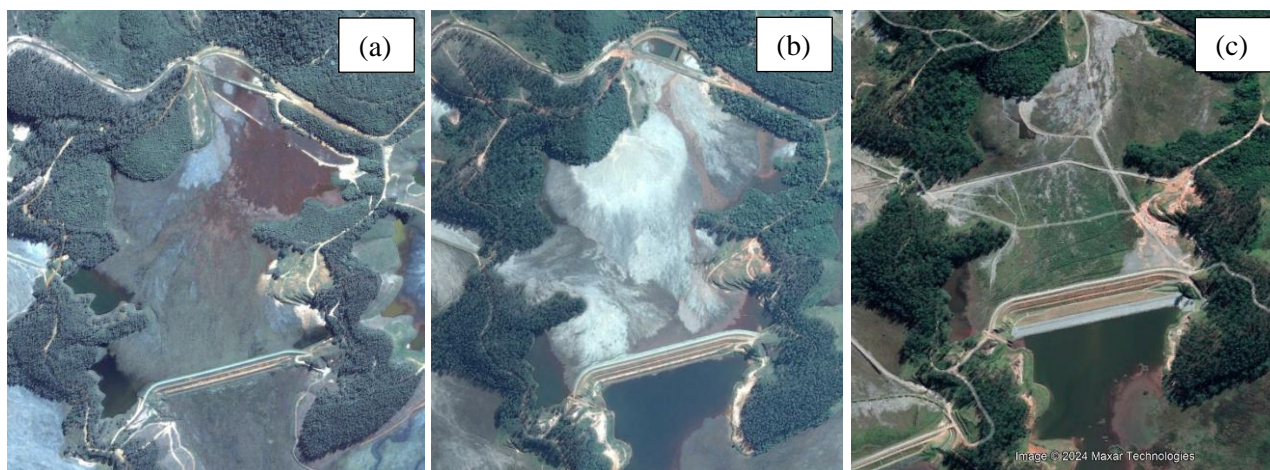


Figura 2. Em (a) ilustra a estrutura em 2003, (b) condição da estrutura em 2013 e (c) condição da estrutura em 2019.

O conceito do projeto conforme prescrito na legislação brasileira tem por objetivo também a estabilidade física a longo prazo das estruturas remanescentes. Sendo, no dique em estudo, adotada a combinação do aterro a jusante com a escavação parcial do seu maciço e reservatório a fim de transforma-se a região em uma praia de rejeitos, retirando-se, assim, a função de barramento e a sua descaracterização como barragem de mineração. Conforme pode ser observado na Figura 3, a solução adotada buscou uma geometria final suavizada, com inclinações inferiores à 4%, de modo a permitir fatores de segurança acima do recomendado pela legislação. As áreas demarcadas em vermelho demonstram a região de escavação e as hachuradas diagonalmente em verde apresentam a área de aterro.

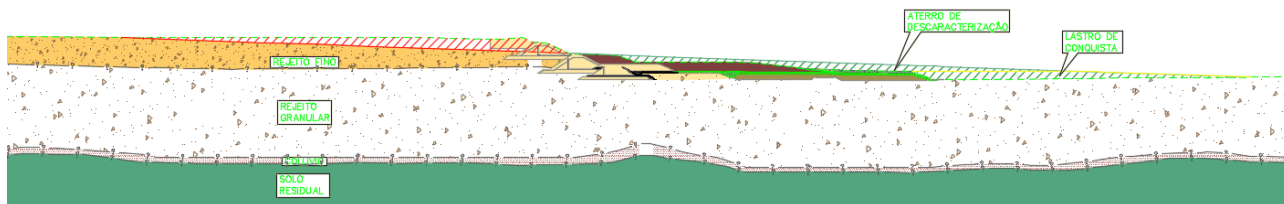


Figura 3. Seção geológica-geotécnica representando as regiões de corte e aterro para descaracterização da estrutura.

Além disso, conforme supracitado (item 2.1.3) a linha freática adotada nas análises de estabilidade da superfície final descaracterizada levou em consideração o cenário no qual o nível d'água aproximava-se da base dos canais de drenagem e da superfície final de projeto, Figura 4 a 6. No entanto, ao observarmos a piezometria após início das obras de descaracterização, período seco de 2022, nota-se que os níveis piezométricos considerados em projeto apresentam-se conservadores nas regiões do antigo maciço, ou seja, maiores do que os registrados após as obras. Na Tabela 2 são mostradas as leituras piezométricas consideradas em projeto e os valores máximos atingidos após iniciadas as escavações no reservatório.

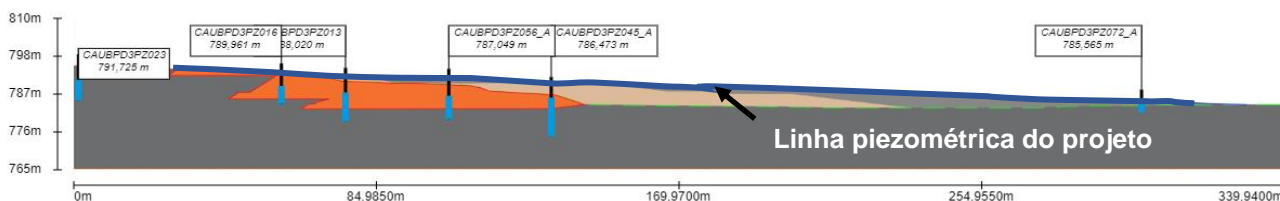


Figura 4. Seção A-A descaracterizada e instrumentada.

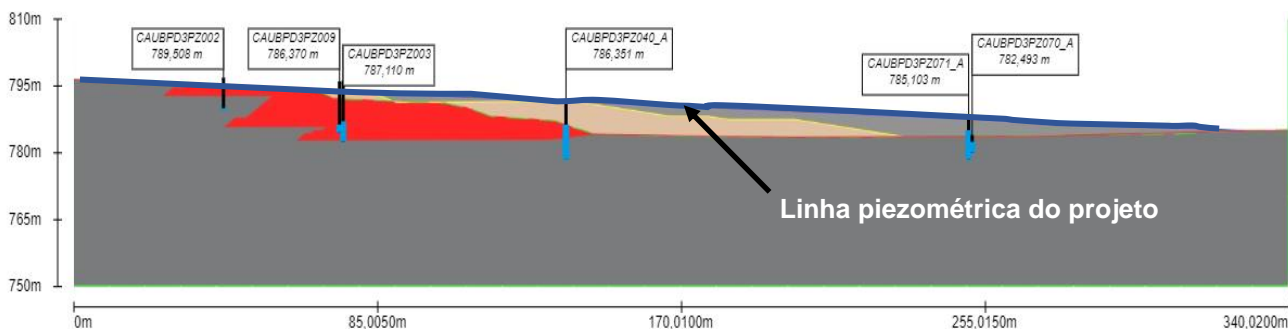


Figura 5. Seção B-B descaracterizada e instrumentada.

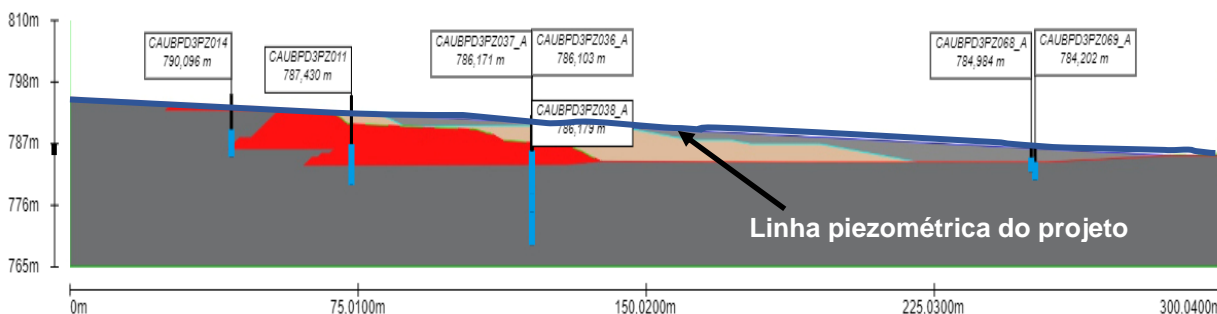


Figura 6. Seção C-C descaracterizada e instrumentada.

Tabela 2. Leituras piezométricas nas análises de estabilidade de projeto, modelo hidrogeológico e, por fim, leituras máximas obtidas após descaracterização da estrutura – Seção A-A.

Código do Instrumento	Leitura admitida em Projeto (m)	Leitura Modelo Hidrogeológico (m)	Leitura máxima após descaracterização (m)	
			2023	2024
CAUBPD3PZ016	791,22	791,64	790,89	790,21
CAUBPD3PZ023	794,01	792,53	792,61	792,03
CAUBPD3PZ013	789,08	791,40	788,62	788,24
CAUBPD3PZ056_A	789,03	791,22	787,61	787,29
CAUBPD3PZ045_A	787,16	786,95	786,99	786,74
CAUBPD3PZ072_A	785,90	785,77	786,04	785,56

Nota-se nas Tabelas 2, 3 e 4 que os instrumentos CAUBPD3PZ072_A, CAUBPD3PZ070_A e CAUBPD3PZ068_A, localizados a jusante das seções transversais, atingiram valor de piezometria acima daquele previsto em projeto. Estes instrumentos encontram-se a jusante do antigo barramento da estrutura, Figura 4 a 6, região no qual há o encontro com o reservatório da barragem principal do sistema e a bacia de dissipação do canal periférico, o que não interfere nos fatores de segurança da estrutura.

Tabela 3. Leituras piezométricas nas análises de estabilidade de projeto, modelo hidrogeológico e, por fim, leituras máximas obtidas após descaracterização da estrutura – Seção B-B.

Código do Instrumento	Leitura admitida em Projeto (m)	Leitura Modelo Hidrogeológico (m)	Leitura máxima após descaracterização (m)	
			2023	2024
CAUBPD3PZ003	787,73	790,68	787,52	787,3
CAUBPD3PZ002	790,49	791,08	789,96	789,63
CAUBPD3PZ070_A	782,30	785,38	783,13	782,90
CAUBPD3PZ040_A	786,60	786,67	786,48	786,35
CAUBPD3PZ054_A	787,37	787,97	787,22	787,06
CAUBPD3PZ063_A	788,52	790,71	788,10	787,54

Tabela 4. Leituras piezométricas nas análises de estabilidade de projeto, modelo hidrogeológico e, por fim, leituras máximas obtidas após descaracterização da estrutura – Seção C-C.

Código do Instrumento	Leitura admitida em Projeto (m)	Leitura Modelo Hidrogeológico (m)	Leitura máxima após descaracterização (m)	
			2023	2024
CAUBPD3PZ069_A	785,85	785,76	784,84	784,75
CAUBPD3PZ068_A	785,58	785,76	785,80	785,51
CAUBPD3PZ014	791,79	791,79	791,51	790,37
CAUBPD3PZ011	788,32	791,79	787,96	787,64

Associada à geometria de descaracterização, o controle hidrológico e hidrogeológico é outro importante aspecto, uma vez que desempenha um papel crucial, implementando medidas efetivas para reduzir ou eliminar aportes de águas no reservatório. Conforme já abordado, a obra apresenta dois canais de drenagem com o objetivo de conduzir o escoamento superficial proveniente da precipitação incidente diretamente sobre a bacia de contribuição, direcionando-o para jusante com velocidades compatíveis com o material, evitando processos erosivos na praia de rejeitos e, ainda, garantindo ausência de acúmulo de água na região do antigo reservatório formado pelo barramento e a jusante. Na Figura 7 (a) é apresentado no projeto o arranjo geral contemplando os canais periféricos, na Figura 7 (b) apresenta o as built e na Figura 7 (c) a obra de descaracterização finalizada.

Ambos os canais periféricos, adotou-se o tempo de retorno de 500 anos, conforme preconizado pela NBR 13.028 (ABNT, 2017), atendendo a Resolução Conjunta SEMAD/FEAM nº 2.784 de 21 de março de 2019.

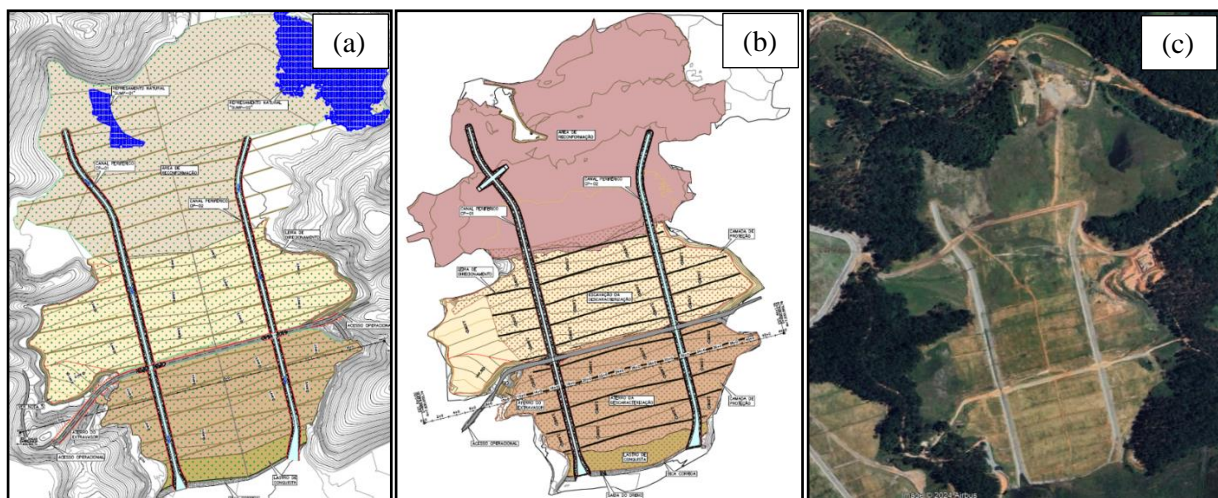


Figura 7. Na imagem (a) ilustra o projeto de descaracterização e (b) obra de descaracterização finalizada.

Após finalizadas as obras de descaracterização em 2022, durante inspeções visuais de rotina, foi possível verificar que não houve acúmulo d'água na área descaracterizada, o que indica a efetividade do conjunto canais periféricos e leiras direcionadoras (Figura 8). Estas últimas foram executadas a fim de reduzir as bacias de contribuição ao longo da porção descaracterizada e, conseqüentemente, evitar o carreamento de partículas e o ravinamento. É importante destacar que toda a área descaracterizada também recebeu proteção vegetal por meio de um mix de sementes reintegrando-a ao meio ambiente e contribuindo, também, para a proteção da superfície. Na Figura 9 pode-se observar as condições do reservatório antes do início das obras.

No que refere-se a estabilização química, em virtude de os rejeitos dispostos a montante e na fundação da estrutura serem classificados como não perigosos – inertes (classe II-B), de acordo com a norma NBR 10.004 (ABNT, 2004), não foram necessárias ações adicionais no sentido de estabilização química/biológica dos mesmos.

Este conjunto de etapas adotadas para estrutura do Dique 03 não apenas resulta em uma redução de riscos, mas também um compromisso com a sustentabilidade e a responsabilidade ambiental no setor de mineração.

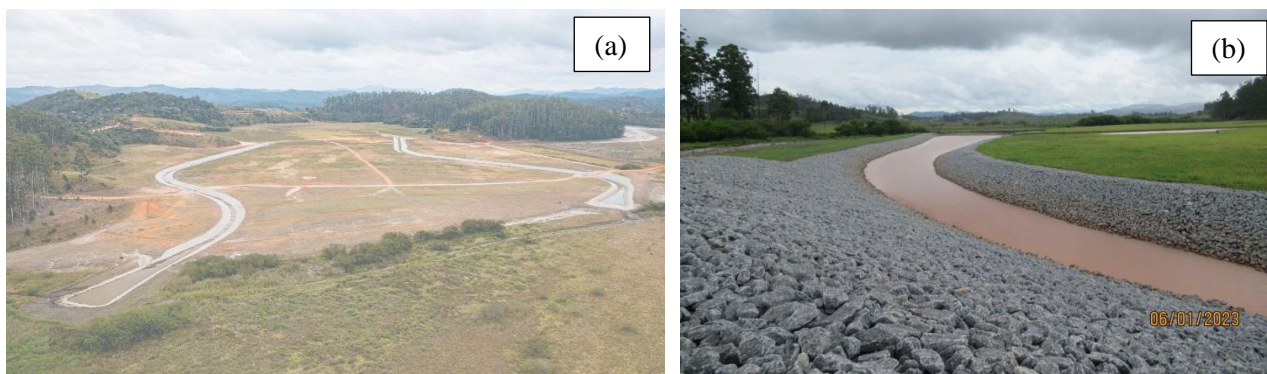


Figura 8. Na imagem (a) ilustra o canal operante em outubro de 2023 e em (b) o canal em 06/01/2023.



Figura 9. Inspeção na estrutura realizada em dezembro de 2018 onde observa-se o aporte d'água a jusante da estrutura.

4 CONCLUSÃO

A descaracterização bem-sucedida do dique em estudo representa um marco importante na busca por segurança e sustentabilidade na indústria de mineração. A abordagem integrada adotada, que incluiu uma análise geotécnica detalhada, modelagem hidrogeológica e monitoramento contínuo, demonstrou um alto desempenho na mitigação de riscos associados a barragens de rejeitos. Ao enfrentar os desafios complexos da descaracterização, este projeto estabeleceu um padrão para futuras iniciativas de segurança em estruturas similares em todo o mundo.

Além de reduzir os riscos imediatos de colapso, a descaracterização desta estrutura teve impactos positivos adicionais. Ao transformar a área em uma praia de rejeitos estável e eliminar a função de contenção da estrutura, o projeto contribuiu para a reintegração da área ao meio ambiente e das comunidades circunvizinhas. Essa abordagem demonstrou um compromisso tangível com a responsabilidade ambiental e o bem-estar das comunidades afetadas.

A adesão rigorosa às regulamentações estabelecidas pela Agência Nacional de Mineração do Brasil e outras entidades foi fundamental para o sucesso da descaracterização da estrutura. A conformidade estrita não só garantiu a implementação de medidas eficazes de mitigação de riscos, mas também fortaleceu a confiança do público nas operações de mineração e nas autoridades reguladoras.

Documentando os desafios enfrentados e as soluções encontradas durante o processo de descaracterização aliadas as melhores práticas do mercado, este estudo oferece valiosos *insights* para profissionais do setor, autoridades reguladoras e comunidades afetadas. A troca de conhecimentos e experiências resultante desse trabalho pode informar e orientar futuras iniciativas de descaracterização de barragens, contribuindo para a contínua melhoria da segurança e da sustentabilidade na indústria de mineração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chang, D., Guo, H., Yin, J., & Xu, W. (2021). Liquefaction analysis of a tailings dam in the Yunnan-Guizhou Plateau, China. *Environmental Earth Sciences*, 80 (5), p.1-13.
- Silva, M. A. S., Nogueira, F. C., & Nunes, C. B. (2023). Liquefaction analysis of a dam foundation considering local site effects. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 149(1), p.78-89.
- Turan, N., Kaya, I., & Balci, C. (2022). Investigation of liquefaction potential of tailings dams using cyclic triaxial tests. *Environmental Earth Sciences*, 81(9), p.1-14.
- Zhang, J., Zhang, J., Tian, H., Guo, W., & Huo, W. (2022). Liquefaction risk assessment of tailings dams considering seismic and dynamic properties of tailings. *Journal of Earthquake Engineering*, 26(1), p.64-86.