

## Estudo de caso sobre a descaracterização de barragem alteada a montante pela remoção completa do maciço e do reservatório

Renan Landim Campos

Engenheiro Civil, Tetra Tech South America, Belo Horizonte, Brasil, renan.campos@tetrattech.com

Matheus Junio Silveira Alves

Geólogo, Tetra Tech South America, Belo Horizonte, Brasil, matheus.alves@tetrattech.com

Eduardo Hollerbach Klier

Engenheiro Civil, Tetra Tech South America, Belo Horizonte, Brasil, eduardo.klier@tetrattech.com

Eisenhower da Silva Feio

Geólogo, VALE S.A., Congonhas, Brasil, eisenhower.feio@vale.com

Bárbara Fernanda Gonçalves Braz

Engenheira Civil, VALE S.A., Congonhas, Brasil, barbara.braz@vale.com

**RESUMO:** O presente artigo visa apresentar o estudo de caso relativo à descaracterização de uma barragem alteada a montante, que tinha como função a contenção de sedimentos em área de mineração. A estrutura se encaixa no contexto do quadrilátero ferrífero, em Minas Gerais, e passou por uma remoção completa do maciço em aterro compactado e de todo o sedimento depositado no reservatório. As atividades de obra foram executadas ao longo de um ano, e contaram exclusivamente com equipamentos mecânicos tradicionais, ora trabalhando pelas ombreiras, ora avançando a partir de aterros de conquista lançados sobre o sedimento. Múltiplas foram as soluções de engenharia necessárias para garantir que os lastros operacionais seriam estáveis, para garantir que o nível freático estivesse rebaixado, e para preservar a integridade da estrutura até que ela estivesse apta a ter sua crista progressivamente reduzida. Em uma primeira sessão, o projeto executivo é brevemente descrito. Na sequência, são expostos resultados, imagens e informações relativas as atividades de campo. Objetiva-se, com isso, comparar o projetado com o implantado, evidenciando as experiências obtidas e as lições aprendidas que podem auxiliar a comunidade científica no desenvolvimento de futuras soluções.

**PALAVRAS-CHAVE:** Descaracterização, barragem, sedimento, remoção total.

**ABSTRACT:** The paper aims to present a case study regarding the decharacterization of an upstream raised dam, which had the function of containing sediments in a mining area. The structure is located in Minas Gerais and underwent a complete removal of the compacted embankment and all sediment deposited in the impoundment. Construction activities were carried out over two years and relied exclusively on traditional mechanical equipment, sometimes working from the abutments and at other times advancing from dumped fill embankments placed over the sediment. Multiple engineering solutions were necessary to ensure that operational ballasts would be stable, to lower the water table, and to preserve the integrity of the structure until it was ready to have its crest progressively reduced. In a first section, the executive design is briefly described. Subsequently, results, images, and information related to field activities are presented. The objective is to compare the planned with the implemented, highlighting the experiences gained and lessons learned that can assist the scientific community in developing future solutions.

**KEYWORDS:** Decharacterization, dam, sediment, complete removal.

## 1 INTRODUÇÃO

A partir da Resolução nº 13, publicada pela ANM em 2019 e posteriormente atualizada pelas Resoluções nº 95 e 130, foi estabelecida uma proibição em âmbito federal de barragens alteadas pelo método de montante. Em todo o território nacional, dezenas de estruturas de contenção de rejeitos e sedimentos se enquadravam nessa característica. Com isso, uma enorme demanda surgiu no meio da engenharia geotécnica, sobre a qual passou a ser necessário projetar, planejar e implantar soluções complexas em tempos limitados.

Para a descaracterização das barragens, muitas são as alternativas técnicas possíveis. Algumas delas permitem a manutenção completa ou parcial do maciço e/ou dos materiais contidos no reservatório. Para estruturas de pequeno e médio porte, contudo, a remoção total do material antrópico é uma alternativa interessante, que sempre deve ser avaliada e que para muitos cenários pode se mostrar a mais adequada. Todavia, a remoção completa não é uma solução trivial, visto que ela deve ser feita em um sequenciamento construtivo que permita nunca colocar o barramento em uma condição de segurança inadequada, ainda que ela seja transitória. Soma-se a isso a dificuldade operacional de trabalhar com veículos e equipamentos mecânicos sobre rejeitos/sedimentos inconsolidados, saturados e que oferecem pouca capacidade de suporte.

Com o objetivo de tratar dos desafios supracitados, desenvolve-se um estudo de caso relativo à descaracterização de uma barragem real. A estrutura escolhida se insere no contexto do quadrilátero ferrífero, em Minas Gerais, e estava em operação com o objetivo de contenção dos sedimentos gerados em uma área de extração do minério de ferro. Ela foi construída em 1983, com um maciço em aterro compactado em seção homogênea. Ao longo dos anos, ela passou por 03 alteamentos, sendo os dois últimos pelo método de linha de centro, e o primeiro para montante. Com isso, a estrutura se enquadrava na nova política para descaracterização de barragens.

No que tange aos aspectos geométricos, a barragem estudada apresenta altura máxima de 18,0 m, crista com 144,0 m de comprimento, e reservatório com volume total igual a 98.250 m<sup>3</sup>. Já em relação à composição geológico-geotécnica, o maciço se apoia em uma camada contínua de canga detrito-laterítica, sobreposta a um perfil de solo de alteração do filito. A Figura 1 ilustra a conformação do barramento anterior a descaracterização, enquanto a Figura 2 apresenta os contatos geológico-geotécnicos de uma seção típica.



Figura 1. Imagem aérea do barramento anteriormente à descaracterização

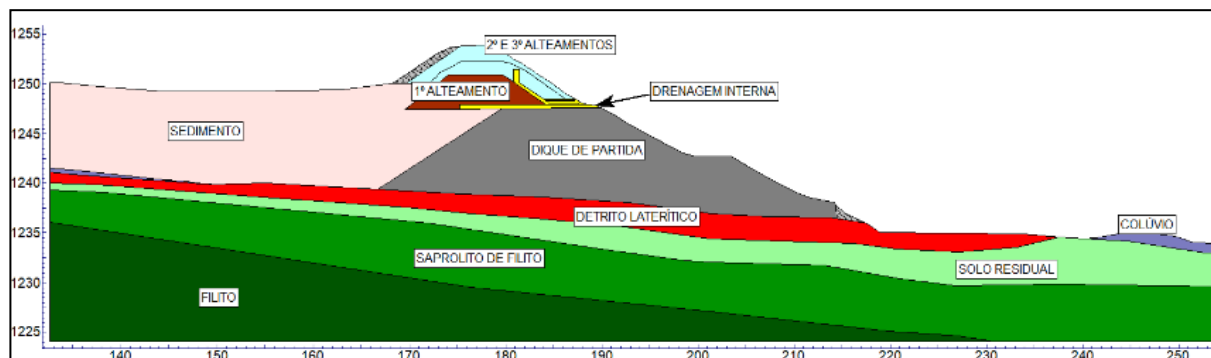


Figura 2. Contatos geológico-geotécnicos em seção típica da barragem

Durante a fase de concepção da solução para descaracterização da estrutura, foi conduzido um estudo de alternativas. Em função do pequeno porte da estrutura, tanto do maciço quanto do reservatório, a solução que se mostrou mais efetiva foi a remoção completa do maciço e de todo o sedimento contido no reservatório. Após essa definição, entre os anos de 2019 e 2021 foi desenvolvido um projeto de engenharia, passando por todas as etapas de detalhamento: conceitual, básico e executivo. A partir de agosto de 2021, iniciaram-se as obras de implantação em campo. Após um ano, em julho de 2022, as obras foram encerradas, com o terreno natural sendo atingido em toda área que anteriormente compunha o maciço e o reservatório.

Visando ampliar o detalhamento do estudo de caso proposto, os capítulos seguintes desenvolvem a abordagem em três principais linhas. Inicialmente, serão apresentadas as principais definições do projeto detalhado. Na sequência, introduz-se o desenvolvimento das obras em campo. Por fim, é feita uma discussão entre o projetado e o executado, avaliando tecnicamente como o projeto venceu os desafios que eram impostos, trazendo as lições aprendidas que podem ser consideradas pela comunidade científica durante a elaboração e construção de projetos com objetivos e abordagens similares.

## 2 PROJETO DETALHADO

O projeto executivo para descaracterização da barragem abordada nesse estudo de caso foi concluído em 2021. Em linhas gerais, ele era composto por 03 fases que deveriam ser executadas durante aproximadamente 02 anos, cobrindo 02 períodos de estiagem e um período chuvoso.

A primeira fase prevista para o período de estiagem de 2021 visava estabelecer toda a infraestrutura necessária para a obra (acessos, área de secagem, sistemas de desvio, contenções e poços), além de iniciar uma remoção parcial dos sedimentos contidos no reservatório. Esta fase dividia-se em 09 principais etapas, quais sejam:

- Construção de poços de rebaixamento;
- Aplicação de retentores de sedimento;
- Adequação da área de disposição temporária;
- Ampliação dos acessos existentes (principal e perimetrais);
- Ampliação do *sump* a montante do reservatório;
- Reforço da ombreira esquerda em solo grampeado;
- Construção do canal de desvio da margem direita hidráulica;
- Remoção parcial de sedimentos;
- Desconexão do sistema de desvio.

A segunda fase trata de um momento transitório, no qual não haveria atividades de obra em função do período chuvoso entre 2021 e 2022. Nessa etapa era previsto um constante monitoramento da estrutura, associado a uma equipe de manutenção disponível para eventuais ações corretivas e/ou emergenciais, além de limpezas frequentes dos *sumps* operacionais posicionados na área.

A terceira fase, por sua vez, contempla a remoção de todo o sedimento ainda remanescente, e também a escavação do maciço compactado e de seus alteamentos. Ao final dessa fase, a estrutura estaria descaracterizada. O sequenciamento construtivo foi dividido nas seguintes atividades:

- Conexão do sistema de desvio;
- Remoção dos sedimentos e da barragem existente;
- Revegetação dos taludes;
- Remoção das obras de desvio provisórias.

Para o rebaixamento do nível freático durante as obras, a solução propunha a execução de canais de desvio, os quais tem por objetivo cortar a contribuição perene de água e com auxílio de um bombeamento ensecar o interior do reservatório. Conjuntamente, dois poços de rebaixamento foram projetados, sendo um deles localizado na cabeceira do reservatório, e outro em aterro de conquista na porção central. A Figura 3 ilustra esses dispositivos.

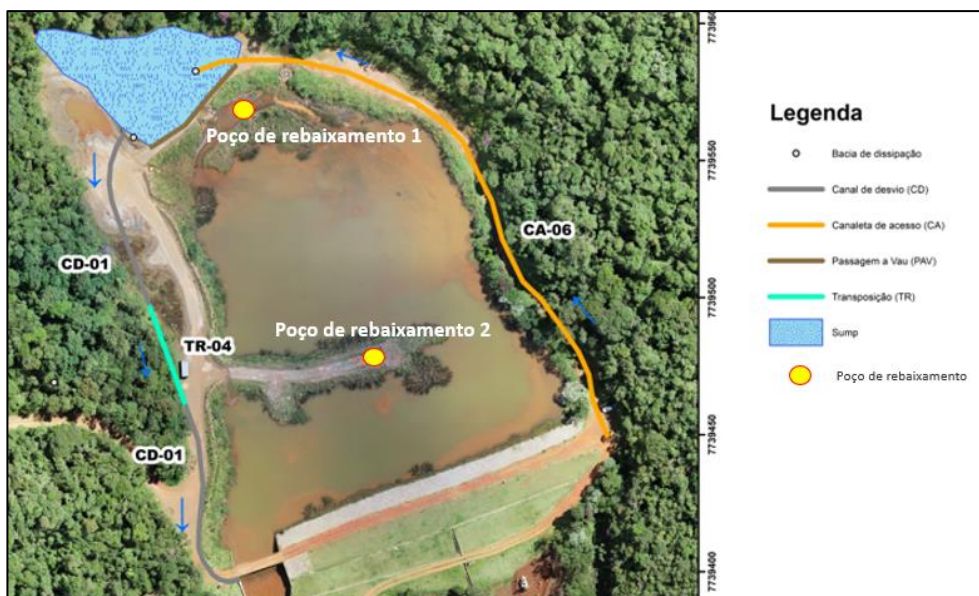


Figura 3. Sistema de desvio e poços de rebaixamento – Projeto executivo

Para a remoção dos sedimentos no interior do reservatório, foi proposta uma técnica inteiramente mecânica, que consistia na escavação por lâminas a partir de aterros de conquista. Com o alcance das escavadeiras hidráulicas selecionadas, é possível escavar uma espessura de 2 m de sedimento para cada arranjo de aterros de conquista executados, conforme ilustra a Figura 4.

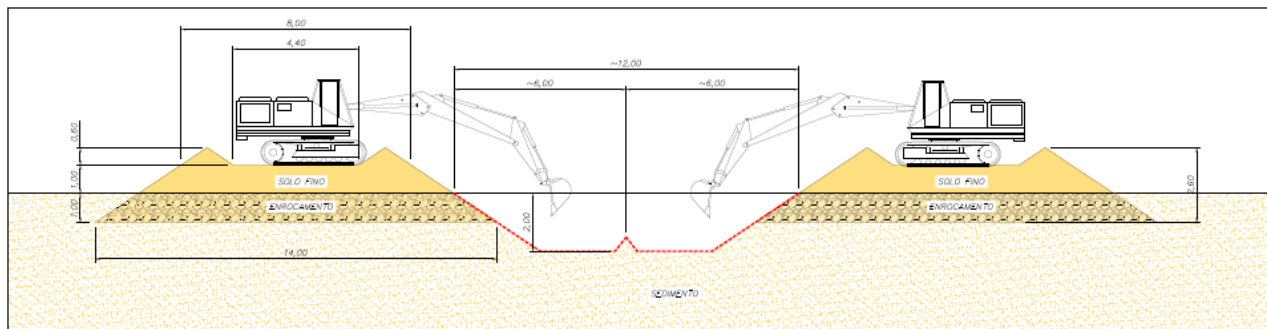


Figura 4. Seção típica dos aterros de conquista – Projeto executivo

Para a Fase 1, com o objetivo de escavar apenas a porção mais a montante do reservatório, preservando o trecho de proximidade com os alteamentos da barragem, foram dimensionados 04 arranjos de aterro de conquista, conseguindo assim atingir os 08 m de profundidade necessários. O projeto é apresentado na Figura 5.

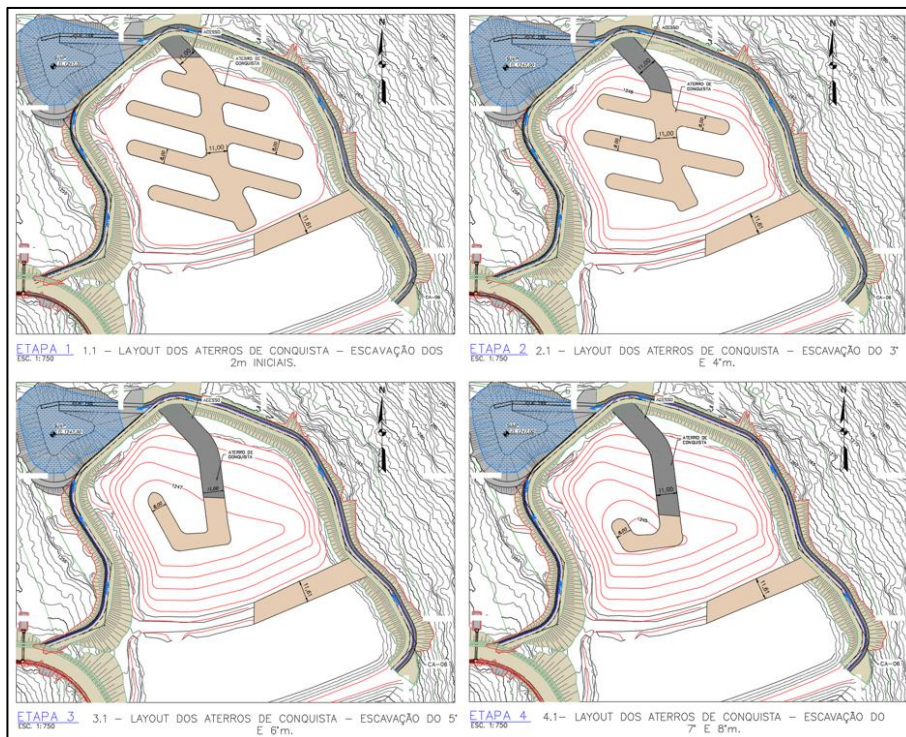


Figura 5. Arranjos de aterro de conquista – Fase 1 – Projeto executivo

A Fase 3, conduzida no segundo período de estiagem, foi projetada para iniciar com a remoção dos alteamentos da barragem, a partir de escavadeiras anfíbias trabalhando no interior do reservatório, em posições próximas à crista. Removendo esse material, ele seria distribuído em um platô, com as atividades progredindo para o avanço de 2,0 em 2,0 m com múltiplos arranjos de aterro de conquista, assim como na Fase 1. A Figura 6 apresenta o projeto desses arranjos.

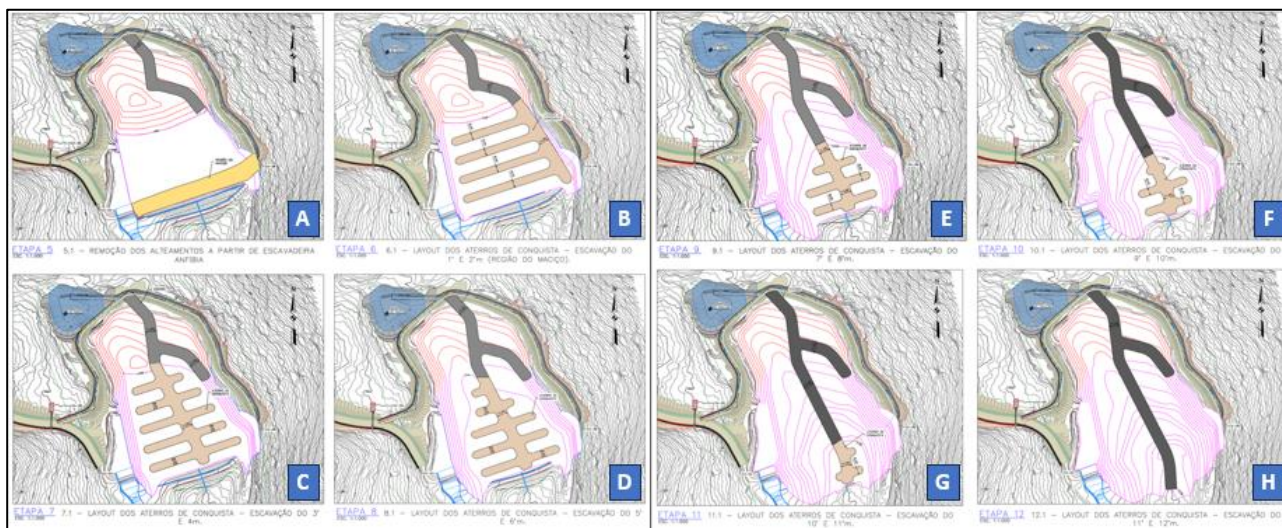


Figura 6. Arranjos de aterro de conquista – Fase 3 – Projeto executivo

Para todas as etapas de remoção de sedimento, eles seriam escavados em uma condição de elevada saturação. Dessa maneira, foi desenvolvida uma área de secagem em região adjacente. O sedimento seria, então, escavado no reservatório, colocado em caminhões e levado até a área de secagem. Nela, cada ciclo de secagem seria composto por 04 dias em baias alternadas. Após atingir o teor de umidade alvo, o material seria

novamente colocado em caminhões para que fosse transportado até sua destinação final em outra porção da mina.

### 3 EXECUÇÃO DAS OBRAS

Devido a mudanças no planejamento e no cronograma de obra, a divisão em 03 fases que havia sido proposta em projeto foi alterada logo no início da implantação. As atividades começaram no final de agosto de 2021, quando o primeiro período de estiagem que iria compor a Fase 1 já estava em seus meses finais. Dessa maneira, passou-se a trabalhar em um conceito de fase única, com algumas das atividades sendo executadas durante o período chuvoso entre 2021 e 2022. Optou-se por priorizar atividades de infraestrutura que envolvem menor terraplenagem durante esse período, com a remoção dos sedimentos e do maciço iniciando apenas em março de 2022.

A segunda principal alteração de projeto fez referência ao rebaixamento do nível freático. O sistema de desvio foi implantado com sucesso, e de maneira aderente ao dimensionado, mesmo com sua execução ocorrendo majoritariamente durante o período chuvoso. Todavia, para o rebaixamento subsuperficial, observou-se que o esgotamento da lâmina d'água e a execução de pequenas valas de drenagem pelas margens do reservatório, a partir de escavadeiras de braço longo, era suficiente para garantir um teor de umidade do rejeito que permitisse capacidade de carga adequada para lançamento dos aterros de conquista. Dessa maneira, foi dispensada a aplicação do sistema de dois poços de rebaixamento que havia sido desenvolvido durante a etapa de projeto detalhado.

A solução de lançamento de aterros de conquista para alcançar todo o reservatório possibilitando a remoção completa de sedimentos foi eficiente. Conforme ilustrado na Figura 7(a) a geometria em seção transversal seguiu dimensões próximas as de projeto, e em nenhum momento durante a execução das atividades foram identificados problemas de atolamento dos equipamentos ou rupturas locais dos lastros. Em relação aos arranjos propostos, sua concepção também foi seguida em campo (Figura 8 e Figura 9), contando apenas com pequenos ajustes, uma vez que as obras para remoção dos sedimentos passaram a consistir em uma etapa única, sem a necessidade de limitar a área de atuação como era definido para a Fase 1.

A escavação da crista e dos alteamentos da barragem foi executada a partir da uma plataforma lançada inicialmente na ombreira esquerda do maciço (Figura 7(b)), com escavadeiras hidráulicas tradicionais entrando sobre o próprio maciço, promovendo uma escavação progressiva no sentido leste-oeste. Essa alternativa se mostrou mais adequada em relação a utilização de escavadeiras anfíbias pelo interior do reservatório. Após o nivelamento com a superfície de sedimentos, o sequenciamento voltou a seguir os arranjos de aterros de conquista propostos.

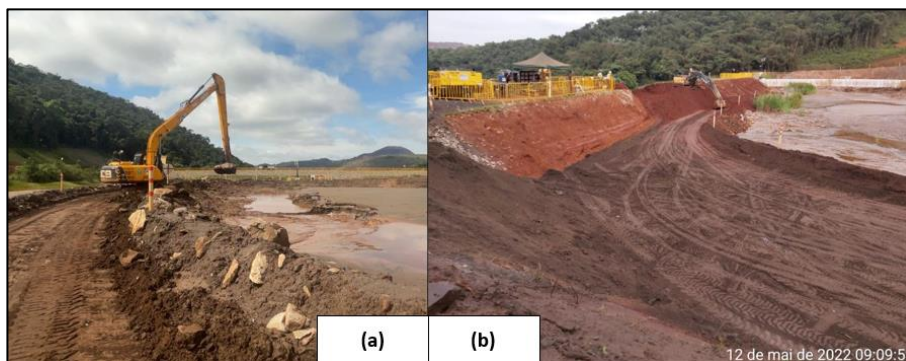


Figura 7. (a) Aterro de conquista (b) Remoção da crista a partir da ombreira esquerda

A Figura 8 e a Figura 9 apresentam um histórico de fotografias aéreas realizadas durante a execução das obras. Foi dado enfoque ao período de remoção do sedimento e do maciço, no período de estiagem de 2022. Todavia, nas imagens é possível notar que atividades de infraestrutura como acessos (principal e perimetrais) já estava concluída, bem como o sistema de desvio, que pode ser percebido pelas aduelas de concreto conectando o *sump* a montante do reservatório com o emboque do sistema extravasor. Destaca-se, ainda, que conforme se adentrava no período de estiagem e na remoção do maciço, alguns equipamentos passaram a

conseguir transitar sobre o aterro e os sedimentos sem a necessidade dos lastros operacionais, otimizando os momentos finais de obra.



Figura 8. Desenvolvimento das obras para descaracterização – Imagens aéreas



Figura 9. Desenvolvimento das obras para descaracterização – Imagens aéreas

É importante notar que ao final da descaracterização do barramento a área em questão seria ressignificada para a implantação de uma nova solução de contenção de sedimentos, uma vez que a demanda por controle ambiental permanece ativa. Por esse motivo, a região do reservatório não foi revegetada e a estrutura de concreto que configurava o sistema extravasor pela ombreira direita foi preservada.

No que tange à destinação final dos materiais, observou-se que durante o período de estiagem os ciclos de secagem de aproximadamente 04 dias eram suficientes para garantia do teor de umidade necessário para transporte do sedimento. Contudo, em função da concentração de todos os esforços para remoção de sedimentos em apenas um período de estiagem, foi necessário ampliar a capacidade da área de secagem que havia sido prevista, de forma a acompanhar um cronograma de obra mais acelerado. O material proveniente do maciço compactado, por sua vez, já era removido em teores de umidade adequados, podendo ser encaminhado diretamente para sua destinação final.

Para os aspectos hidrológicos e hidráulicos, notou-se que todo o sistema de desvio, com o auxílio do *sump* de montante, foi suficiente para garantir o ensecamento da área durante as obras no período de estiagem. No período chuvoso, o reservatório da barragem operou em conjunto com o sistema de desvio, e o funcionamento também foi adequado, sem nenhuma intercorrência. Ambientalmente, o controle de turbidez foi feito múltiplas vezes ao dia, visando garantir a qualidade do efluente que vertia pelo sistema extravasor.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De forma geral, a solução de remoção completa dos sedimentos e do maciço se mostrou adequada para a barragem apresentada neste estudo de caso. As atividades de obra se desenvolveram com fluidez, dentro dos

prazos esperados e sem contar com a necessidade de alterações robustas ao projeto de descaracterização. Para estruturas de porte similar, a solução apresentada deve se colocar como alternativa viável a ser estudada considerando o contexto de cada demanda.

Em relação aos equipamentos adotados, observa-se que foi viável a execução de todas as atividades sem contar com escavadeiras anfíbias. Apesar de comumente utilizadas em reservatórios de rejeitos e sedimentos, para obras em prazos curtos elas se colocam como uma opção de baixa produtividade e alto custo. O trabalho com escavadeiras hidráulicas tradicionais a partir de aterros de conquista se mostrou mais eficiente, tanto em quesitos técnicos quanto em aspectos de segurança do trabalho. Salienta-se, contudo, que as dimensões apresentadas neste trabalho para os aterros de conquista foram calculadas a partir do porte dos equipamentos e veículos que trafegariam sobre ele, não sendo válidas para quaisquer sobrecargas de obras que se enquadrem em contextos distintos.

A dispensa da necessidade de construção dos poços de rebaixamento trouxe uma série de ganhos às atividades. Todavia, essa também não é uma conclusão que deve ser generalizada. Em situação nas quais o projeto ainda se encontra em fase de desenvolvimento, recomenda-se que além das modelagens de percolação sejam conduzidos testes de rebaixamento em campo, visando calibrar as soluções propostas.

A execução das atividades em período chuvoso e período de estiagem permitiu obter algumas conclusões importantes. Para elementos civis, como canais e contenções, conseguiu-se obter viabilidade de execução e eficiência adequada durante o período chuvoso. Atividades de terraplenagem para construção do acesso operacional, por sua vez, contaram com desafios e baixa produtividade principalmente para o aterro compactado, porém também foram concluídas com sucesso. Já a remoção dos sedimentos se mostrou inadequada em período chuvoso, com o material se comportando de maneira muito solta, sem conseguir perder umidade e/ou oferecer capacidade de carga para que se trabalhasse sobre ele. Dessa maneira, apesar de algumas tentativas, a frente de atuação no maciço e no reservatório só conseguiu deslanchar de fato após a diminuição das chuvas e o início de um período de estiagem.

O monitoramento geotécnico da barragem foi mantido durante todo o tempo de atuação da obra. Observou-se uma progressividade das condições de segurança do maciço, que atingiu mínimos históricos dos instrumentos quando da ativação do sistema de desvio e bombeamento da lâmina d'água. Analogamente, durante as escavações os fatores de segurança eram maximizados a cada etapa de rebaixamento da crista, até que a estrutura foi exaurida por completo, eliminando o risco geotécnico associado.

Finalmente, na temática de controle ambiental, a existência do *sump* localizado a montante e sua incorporação ao sistema de desvio dimensionado foi essencial para garantir a clarificação das águas que eram descarregadas a jusante, e também para viabilizar uma área de tratamento com polímeros quando os indicadores apontavam para uma necessidade de melhoria na qualidade da água. Caso o sistema de desvio fosse composto exclusivamente por canais, o controle ambiental teria sido dificultado. Para o dimensionamento de sistemas parecidos em obras de descaracterização, recomenda-se que a construção de um *sump* ou estrutura de propósito análogo seja considerada.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Tetra Tech e à VALE pela oportunidade de desenvolver este trabalho e por fomentar o avanço científico na área de engenharia. Para além da equipe envolvida na elaboração deste artigo, centenas de profissionais foram imprescindíveis para que a solução abordada fosse concebida, projetada e executada ao longo dos últimos anos. O resultado apresentado é fruto da dedicação e do esforço colaborativo de cada uma dessas pessoas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Mineração (2022). Resolução Nº 13, de 8 de agosto de 2019. *Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração.*
- Agência Nacional de Mineração (2022). Resolução Nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. *Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração.*
- Agência Nacional de Mineração (2022). Resolução Nº 130, de 24 de fevereiro de 2023. *Altera a Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, e dá outras providências.*