XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/38

Disposição Mecanizada de Rejeitos em Cava para Descaracterização de Barragem a Montante no Quadrilátero Ferrífero

Ricardo Cabette Ramos
Engenheiro Geotécnico, VALE S.A., Belo Horizonte, Brasil, ricardo.cabette@vale.com

Anderson Fonini
Engenheiro Geotécnico, FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, fonini@fgs.eng.br

Ben Hur Serra Isoppo
Engenheiro Geotécnico, FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, benhur@fgs.eng.br

Ana Luiza Resende Leal
Engenheira Geotécnica, VALE S.A., Belo Horizonte, Brasil, ana.leal@vale.com

RESUMO: A descaracterização de barragens alteadas a montante pode exigir diferentes abordagens para o descomissionamento, incluindo a remoção total ou parcial do rejeito, o que representa um desafio devido à limitação de espaço para armazenar esse material em muitos locais. Em um caso situado no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, adotou-se uma rota de descaracterização baseada na disposição mecanizada do rejeito em uma cava a céu aberto, utilizando o próprio vazio minerário como célula de confinamento geotécnico. Essa solução responde simultaneamente a três exigências: necessidade regulatória de descaracterizar barragens a montante, limitação física de novas áreas de disposição superficial e obrigação de manter condições seguras de operação durante a remoção e o transporte do material. A execução foi planejada em fases evolutivas. A Fase 1 teve caráter piloto, com lançamento controlado de aproximadamente 75 mil m³ no fundo da cava, para avaliar o comportamento do rejeito disposto mecanicamente, confirmar trafegabilidade e observar estabilidade local. Na Fase 2, a operação foi ampliada para consolidar um platô interno, elevando progressivamente a superfície do fundo da cava a cotas intermediárias, com disposição incremental sem haver elevadas diferenças de desnível e sempre mantendo uma área dedicada ao acúmulo e bombeamento de água. A fase seguinte prevê a continuidade desse enchimento até ocupar algo em torno de 3 milhões de m³ adicionais, elevando o fundo da cava em aproximadamente 13 a 15 metros e levando a superfície média para cotas finais da ordem de 930 m. A metodologia combina deposição mecanizada em camadas sucessivas, controle geométrico para manter taludes baixos e gestão hídrica ativa, com drenagem superficial e subsuperficial, manutenção de um sump e bombeamento contínuo para evitar saturação e perda de suporte durante o tráfego de equipamentos. Os resultados indicam que a cava deixa de ser apenas destino logístico do rejeito e passa a atuar como elemento central do processo de descaracterização: o rejeito é realocado para um corpo geotécnico estável, monitorado e drenado, enquanto a barragem a montante tem seu risco reduzido e avança rumo à retirada definitiva de função de contenção. Essa abordagem demonstra a solução técnica para descaracterização segura de estruturas a montante, cujo conceito é a remoção total de rejeito, com limitação de área para disposição.

PALAVRAS-CHAVE: Descaracterização de barragens; disposição em cava; rejeitos; estabilidade geotécnica; gestão hídrica

ABSTRACT: The decharacterization of upstream-raised dams may require different approaches for decommissioning, including the total or partial removal of tailings, which represents a challenge due to the limited space available to store this material at many sites. In a case located in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, a decharacterization route based on the mechanized disposal of tailings in an open pit was adopted, using the mining void itself as a geotechnical confinement cell. This solution simultaneously addresses three demands: the regulatory need to decharacterize upstream dams, the physical limitation of new surface disposal areas, and the obligation to maintain safe operating conditions during the removal and transport of the material. The execution was planned in progressive phases. Phase 1 had a pilot character, with controlled placement of approximately 75 thousand m³ at the bottom of the pit, in order to evaluate the behavior

of the mechanically disposed tailings, confirm trafficability, and observe local stability. In Phase 2, the operation was expanded to consolidate an internal platform, progressively raising the pit floor surface to intermediate elevations, with incremental disposal without large elevation differences and always maintaining an area dedicated to water accumulation and pumping. The following phase предусматривает the continuation of this filling to occupy around 3 million m³ additional, raising the pit floor by approximately 13 to 15 meters and bringing the average surface to final elevations on the order of 930 m. The methodology combines mechanized deposition in successive layers, geometric control to maintain low slopes, and active water management, with surface and subsurface drainage, maintenance of a sump, and continuous pumping to avoid saturation and loss of support during equipment traffic. The results indicate that the pit ceases to be merely a logistical destination for the tailings and comes to act as a central element of the decharacterization process: the tailings are relocated to a stable, monitored, and drained geotechnical body, while the upstream dam has its risk reduced and progresses toward the definitive removal of its containment function. This approach demonstrates a technical solution for the safe decharacterization of upstream structures whose concept is the total removal of tailings, under conditions of limited disposal area.

KEYWORDS: Dam decharacterization, in-pit disposal, tailings, geotechnical stability, water management

1 INTRODUÇÃO

A descaracterização de barragens alteadas a montante tem imposto à geotecnia de mineração o desafio de desenvolver soluções que conciliem segurança, viabilidade executiva e restrição de áreas disponíveis para disposição de materiais. Nesse contexto, a disposição de rejeitos em cavas exauridas vem sendo discutida como alternativa com potencial de reduzir a necessidade de novas estruturas superficiais, ao mesmo tempo em que aproveita vazios já existentes no ciclo minerário (Mudd et al., 2011; Cacciuttolo et al., 2023). Estudos nessa linha indicam que a disposição em cava não deve ser tratada apenas como solução logística, mas como a construção progressiva de um novo corpo geotécnico, cujo desempenho depende da geometria do enchimento, das propriedades do rejeito, das condições de drenagem e da interação com o sistema hidrogeológico local (McDonald e Lane, 2010; Cacciuttolo et al., 2023).

Além dos potenciais benefícios associados ao fechamento de mina, a literatura mostra que a viabilidade da disposição em cava depende de avaliação específica para cada caso. Mudd et al. (2011) destacam que boas práticas de longo prazo para rejeitos dispostos em cava exigem compreensão integrada de desempenho físico, hidráulico e operacional. Mais recentemente, Cacciuttolo et al. (2023) ressaltam que a disposição em cava pode constituir alternativa responsável para o fechamento sustentável, desde que acompanhada de critérios robustos de projeto, monitoramento e gestão de riscos.

No Brasil, essa discussão ganhou relevância adicional em função da necessidade de descaracterização de barragens a montante e da limitação física para implantação de novas áreas de disposição. Em situações nas quais a remoção total ou parcial dos rejeitos é necessária para a retirada definitiva da função de contenção, a utilização de uma cava pode representar alternativa técnica relevante, desde que sejam asseguradas condições adequadas de estabilidade geotécnica, gestão hídrica e segurança operacional. No caso estudado neste trabalho, a solução foi desenvolvida de forma evolutiva, iniciando por uma fase piloto e avançando para etapas sucessivas de enchimento, com manutenção de área de acúmulo e bombeamento de água, controle geométrico das superfícies e adaptação contínua das premissas executivas.

Assim, este trabalho tem por objetivo apresentar um estudo de caso de disposição mecanizada de rejeitos em cava no Quadrilátero Ferrífero, discutindo a evolução das etapas de implantação, a caracterização geotécnica do rejeito, o sequenciamento construtivo adotado e os principais aspectos de monitoramento, desempenho e lições aprendidas associados à aplicação dessa solução como suporte à descaracterização de barragem a montante.

2 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

O estudo de caso foi desenvolvido em uma estrutura geotécnica localizada em cava no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, utilizada como área receptora de rejeitos provenientes da descaracterização de uma barragem alteada a montante. No contexto do empreendimento, a barragem de origem possuía volume aproximado de 6 milhões de metros cúbicos de rejeito, tendo a cava sido gradualmente incorporada como solução para recebimento desse material ao longo de diferentes etapas executivas. Importante ressaltar que, desde a paralisação das atividades de mineração na cava até o início da disposição passaram-se cerca de 8 anos. Neste período, por a cava funcionar como uma bacia de acúmulo de água, uma quantidade significante de sedimentos depositou-se nela. Logo, o desafio em relação a disposição do rejeito não estava associado somente ao seu comportamento, e sim na associação do comportamento de materiais com características geotécnicas distintas, condição que elevou o grau de dificuldade de predição de desempenho.

A solução de disposição foi desenvolvida de forma sequencial, por meio das Etapas 1, 2, 2A Parcial, 2A e 3, evidenciando construção progressiva à medida que se consolidavam as condições operacionais, geométricas e hidráulicas da disposição na cava. A Etapa 1 correspondeu a uma fase de testes, concebida para avaliar o comportamento do rejeito quando disposto mecanicamente e permitir a operacionalização inicial da solução. Nessa fase, foi realizada a disposição de aproximadamente 75.000 m³ de rejeito, restrita à região central do fundo da cava.

Em seguida, a Etapa 2 ampliou a área de disposição até a cota 900 m, formando um primeiro platô no fundo da cava e preservando, na porção leste, uma região destinada ao acúmulo de água, com volume de disposição de cerca de 495.000 m³. Na sequência, a Etapa 2A Parcial promoveu a elevação desse platô até a cota média de 904 m, contemplando aproximadamente 360.000 m³ de rejeito. Posteriormente, a Etapa 2A ampliou a ocupação para todo o fundo da cava, com disposição de aproximadamente 1.700.000 m³ de rejeito e formação de platô com cota média próxima de 917 m. Por fim, a Etapa 3 foi concebida para aproximadamente 3.100.000 m³ de material, dos quais cerca de 2.500.000 m³ correspondem a rejeitos, elevando a superfície média final da cava para a ordem de 932 m. Na Figura 01 visualiza-se as respectivas etapas detalhadas.

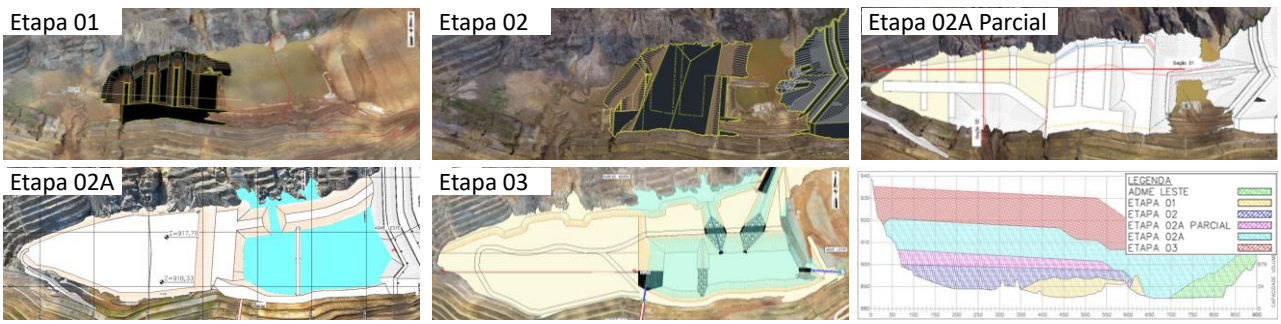


Figura 01. Seção e arranjo geral contendo os projetos das diferentes etapas de disposição de rejeitos na cava.

Essa evolução mostra que a cava deixou de ser tratada apenas como área de recebimento de material e passou a funcionar como elemento central do próprio processo de descaracterização. A cada etapa, o enchimento promoveu não apenas aumento de volume disposto, mas também reconfiguração geométrica do fundo da cava, com elevação progressiva do platô interno e redefinição das condições de drenagem, trafegabilidade e operação. Desse modo, o caso não pode ser interpretado como um projeto isolado de disposição, mas como um processo contínuo de implantação, no qual as fases anteriores forneceram subsídios técnicos e operacionais para o refinamento das fases seguintes.

Do ponto de vista físico, a evolução da disposição foi condicionada pela necessidade de manter uma região funcional para acúmulo e bombeamento de água, o que influenciou diretamente a geometria final de cada etapa. Desde as fases iniciais, foi preservada uma porção rebaixada da cava, especialmente na região leste, destinada ao armazenamento temporário de água, permitindo compatibilizar o avanço do enchimento com a manutenção da segurança hidráulica e operacional, conforme pode ser visualizado na Figura 02. A capacidade volumétrica desta bacia foi determinada a partir de um estudo de balanço hídrico e risco hidrológico, o qual levou em consideração as áreas de contribuição da cava, além dos sistemas periféricos destinados ao tratamento da turbidez e também a capacidade do sistema de bombas de recalque instalado na cava.

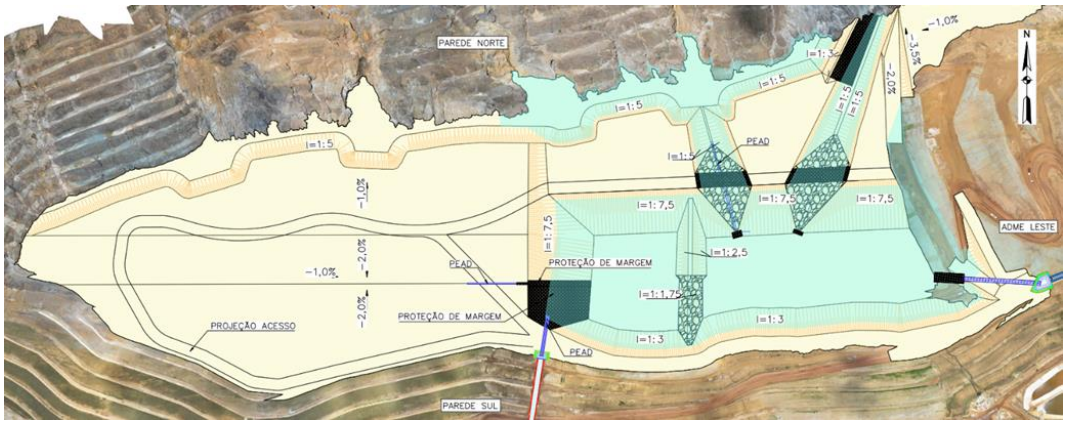


Figura 02. Arranjo geral da cava com destaque para a área de disposição e a região de acúmulo/bombeamento de água.

3 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO REJEITO

A concepção da disposição mecanizada foi apoiada em investigação geotécnica do rejeito e dos materiais presentes no fundo da cava, incluindo campanhas de campo e ensaios laboratoriais. Foram utilizados ensaios de caracterização física, compressão triaxial, adensamento e investigações in situ por piezocone, permitindo interpretar tanto o comportamento do rejeito a ser disposto quanto a condição dos materiais previamente lançados e dos sedimentos presentes na fundação. A Figura 03 demonstra os pontos de investigação por piezocone. O uso combinado de ensaios laboratoriais e de campo é coerente com recomendações clássicas para avaliação de depósitos granulares e finos em geotecnia de mineração (Jamiolkowski et al., 1985; Robertson e Cabal, 2022).

A caracterização indicou comportamento compatível com material cuja resposta geotécnica é sensível à umidade, ao índice de vazios e às condições de lançamento e acomodação. Para o rejeito lançado, adotaram-se parâmetros representativos da condição de disposição mecanizada, enquanto para o rejeito previamente disposto e para os sedimentos do fundo da cava foram considerados parâmetros específicos de resistência e deformabilidade, de forma a representar adequadamente a interação entre o novo corpo de rejeito e sua fundação. Essa abordagem foi importante porque a estabilidade local e a deformabilidade do depósito não dependiam apenas do rejeito recém-lançado, mas do conjunto formado pelo material disposto em diferentes fases e pelos sedimentos já existentes.

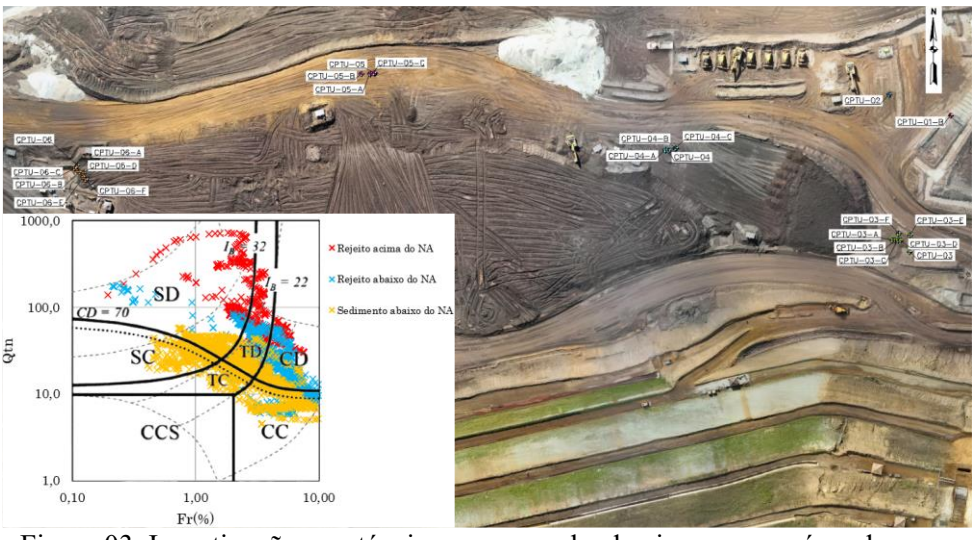


Figura 03. Investigações geotécnicas e campanha de piezocone na área da cava.

Em termos de projeto, os parâmetros adotados foram utilizados para embasar a análise das geometrias executivas, dos acessos temporários e da resposta deformacional do depósito. Para o rejeito disposto,

destacaram-se valores de peso específico natural da ordem de 20 kN/m³ e ângulo de atrito efetivo em torno de 29°, com variações em função da condição do material e da posição considerada. Já para acessos compactados e trechos de maior exigência operacional, foram admitidos parâmetros mais elevados de resistência, compatíveis com o controle executivo adicional adotado nesses segmentos. O conjunto de dados indicou que a solução demandava abordagem conservadora quanto à formação de taludes temporários, à limitação de pressões transmitidas pelos equipamentos e ao controle da água no interior do depósito, conforme observado na Figura 04.

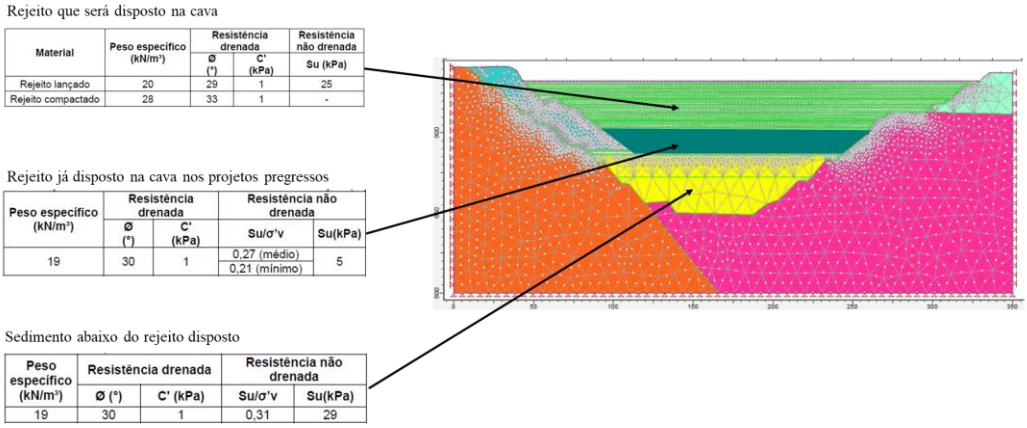


Figura 04. Parâmetros geotécnicos representativos adotados para o rejeito e materiais de fundação.

Por fim, reitera-se que aspecto mais relevante dessa caracterização é que ela forneceu base técnica para a disposição mecanizada como construção de um novo corpo geotécnico, e não apenas como atividade de transporte e lançamento. A interpretação dos parâmetros de resistência e compressibilidade permitiu vincular o método executivo às condições reais do material, contribuindo para definir a forma de avanço da obra, o tratamento dos acessos e a necessidade de monitoramento contínuo ao longo da implantação.

4 SEQUENCIAMENTO CONSTRUTIVO

A disposição mecanizada de rejeitos na cava foi conduzida por meio de alteamento progressivo do fundo, com lançamento, espalhamento e conformação sucessiva do material, de forma a construir uma superfície operacional contínua e compatível com as restrições geotécnicas e hidráulicas da área. O sequenciamento foi desenvolvido de maneira faseada, permitindo adaptar o avanço das frentes às condições observadas em campo e às necessidades operacionais associadas à remoção e ao transporte do rejeito.

A solução construtiva foi baseada na deposição em camadas sucessivas, com controle geométrico voltado à limitação de desníveis acentuados e à manutenção de taludes temporários baixos. Nos acessos internos, adotou-se a execução de faixa com 1,60 m de espessura, em rejeito, estéril ou mistura entre ambos, dividida em quatro camadas de 40 cm, com controle de umidade e compactação por número de passadas, conforme procedimento previamente aferido em aterro experimental. Além do controle executivo, a trafegabilidade desses acessos era verificada em campo.

A geometria executiva dos acessos e taludes temporários foi definida a partir da necessidade de compatibilizar a circulação dos equipamentos com a baixa capacidade de suporte do material recém-disposto. Os acessos na metade oeste foram avaliados considerando taludes com alturas de 2,5 m e 5,0 m, adotando-se sobrecargas de 100 kPa para acessos principais e 60 kPa para acessos secundários. Para essas estruturas temporárias, foi adotado fator de segurança mínimo de 1,3, com avaliação da influência da posição do nível freático sobre as geometrias admissíveis.

Com o avanço da implantação, verificou-se a necessidade de incorporar limites geométricos mais restritivos para as superfícies transitórias. Para os taludes laterais dos acessos internos executados sobre o corpo da disposição, adotou-se inclinação máxima de 1V:5H e altura máxima de 5 m. Em paralelo, o espalhamento nas frentes operacionais foi conduzido de forma a evitar a formação de desníveis excessivos entre áreas recém-lançadas e superfícies já regularizadas.

A gestão hídrica foi incorporada ao sequenciamento como condicionante permanente da execução. A superfície da disposição foi conformada de modo a direcionar o escoamento superficial para a região rebaixada destinada ao acúmulo e bombeamento de água, preservando a funcionalidade do sump ao longo das diferentes fases. Para isso, foram mantidos dispositivos de drenagem superficial e subsuperficial, além de soluções complementares de controle de sólidos e melhoria da qualidade da água acumulada, como Sump`s. Na Figura 05 verifica-se as fases previstas para implantação da Etapa 03 do projeto, bem como o sistema de drenagem previsto. As drenagens do talude norte diferem do talude sul, visto a restrição de uso de equipamentos não tripulados no contato com talude em decorrência de instabilizações geotécnicas, garantindo assim a segurança das operações.

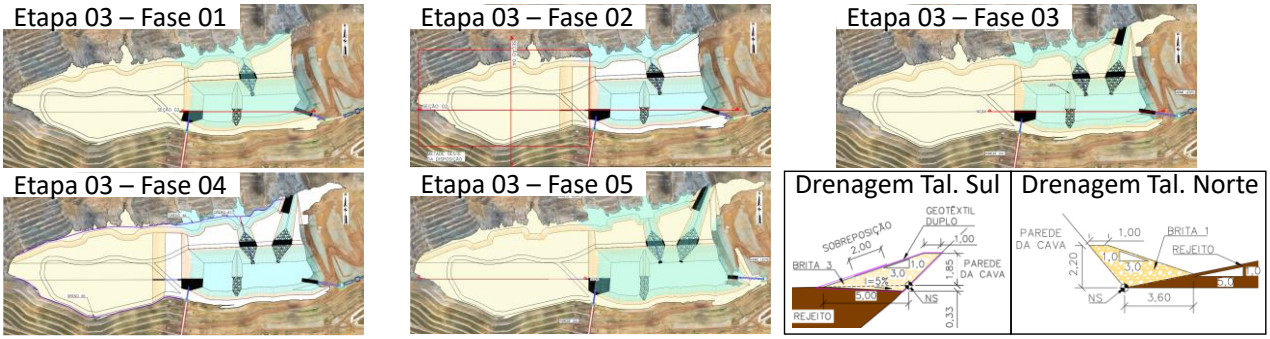


Figura 05. Arranjo esquemático do sequenciamento construtivo e da drenagem associada à disposição referente a Etapa 03.

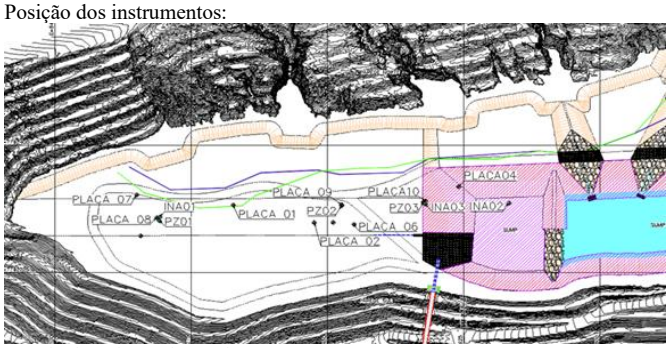
A instrumentação também integrou o sequenciamento construtivo, tanto como suporte ao controle executivo quanto como base para avaliação do comportamento do depósito ao longo da obra. A implantação e preservação dos instrumentos em área sujeita a tráfego intenso de equipamentos demandaram compatibilização com o avanço das frentes e ajustes operacionais contínuos, reforçando o caráter adaptativo da solução.

5 MONITORAMENTO, DESEMPENHO E LIÇÕES APRENDIDAS

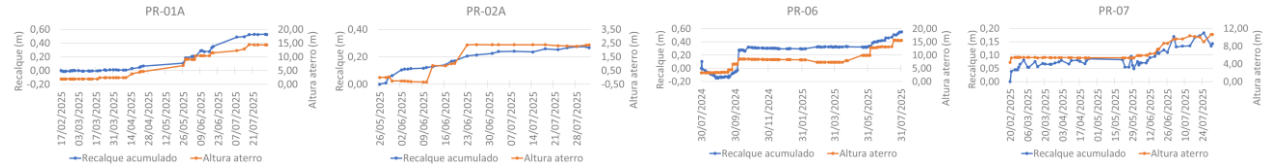
O monitoramento da disposição mecanizada foi conduzido por meio de instrumentação geotécnica e observação de campo, incluindo placas de recalque, indicadores de nível d'água e acompanhamento das condições operacionais da área. Esse conjunto permitiu avaliar a resposta do depósito ao carregamento progressivo, verificar a funcionalidade da drenagem e apoiar ajustes executivos ao longo da implantação.

Os resultados de monitoramento de recalques indicaram que a deformação ocorreu em curto prazo após a aplicação das cargas, com tendência de redução progressiva das taxas de recalque ao longo do tempo. Esse padrão é compatível com a acomodação inicial do rejeito disposto e dos materiais subjacentes, particularmente em condição de material lançado sem controle integral de compactação. A interpretação dos resultados exige cautela, uma vez que as placas foram instaladas após o início da disposição, implicando espessuras variáveis de sedimentos e rejeito abaixo dos instrumentos. Ainda assim, o comportamento observado confirmou a importância do alteamento progressivo e do acompanhamento contínuo do depósito. Em relação aos indicadores de nível de água (INA) e Piezômetros (PZ), os mesmos apresentam um comportamento linear com o nível de água no sump, apresentando baixa sensibilidade em relação ao alteamento do rejeito no fundo da cava.

Posição dos instrumentos:



Resultados Placas de recalques:



Resultados piezômetros e INA's:

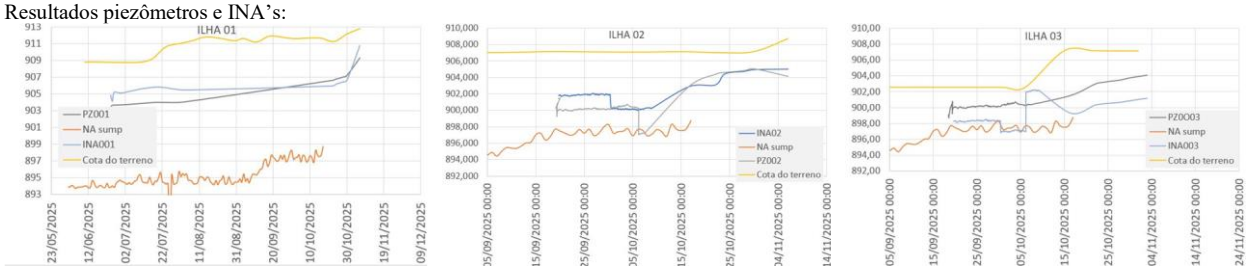


Figura 6. Resultados do monitoramento.

Sob a ótica operacional, um dos principais aprendizados do caso foi a constatação de que a variabilidade do rejeito influencia diretamente o comportamento das geometrias temporárias formadas durante a execução. Diferenças de umidade, compacidade e forma de lançamento afetaram a uniformidade do espalhamento e favoreceram a formação de desníveis transitórios entre áreas recém-dispostas e superfícies já regularizadas. Em função disso, o controle geométrico passou a ter papel central na operação, com limitação de alturas e inclinações dos taludes temporários e também dos acessos internos, de modo a reduzir risco geotécnico e aumentar a previsibilidade operacional.

Outro aspecto relevante foi a própria operação do sistema de monitoramento. A manutenção da instrumentação em área com tráfego intenso de equipamentos exigiu proteção física, alteamento progressivo dos instrumentos e interpretação crítica de leituras afetadas por interferências operacionais. Ainda assim, a continuidade do monitoramento mostrou-se essencial para apoiar a leitura do comportamento da disposição e orientar ajustes executivos ao longo da implantação.

A gestão hídrica revelou-se igualmente determinante para o desempenho global da solução. A manutenção do Sump e bombeamento de água foi condição indispensável para permitir o avanço operacional dos serviços relacionados à disposição . O controle da água mostrou-se parte estrutural da solução, e não apenas condicionante secundária, influenciando diretamente suporte operacional, drenagem e continuidade das atividades. O desempenho verificado ao longo do período chuvoso mostrou-se condizente com as saídas obtidas por meio dos estudos técnicos realizados, sendo o nível máximo de água no sump próximo àquele indicado pelos estudos.

De forma geral, o estudo de caso mostra que a utilização da cava como área de disposição pode constituir alternativa efetiva para apoiar a descaracterização de barragens a montante em cenários com restrição de áreas disponíveis. No entanto, a viabilidade dessa solução depende de abordagem integrada, na qual a disposição do rejeito seja tratada como formação de um corpo geotécnico monitorado, drenado e progressivamente estabilizado, e não apenas como transferência de material entre estruturas. A experiência observada indica que o sucesso da solução está menos associado a um volume final específico e mais à capacidade de controlar, ao longo do tempo, as variáveis que governam seu comportamento: geometria, água, suporte operacional e resposta deformacional do depósito.

6 CONCLUSÕES

A disposição mecanizada de rejeitos em cava mostrou-se alternativa tecnicamente viável para apoiar a descaracterização de barragens alteadas a montante em contextos com restrição de áreas disponíveis para novas estruturas de disposição. A evolução das fases de implantação evidenciou que essa solução não deve ser compreendida como uma intervenção isolada, mas como um processo construtivo progressivo, no qual as etapas iniciais exercem papel fundamental na consolidação das premissas operacionais, geométricas e hidráulicas que orientam as fases subsequentes. Nesse sentido, o estudo de caso demonstrou que a cava pode deixar de atuar apenas como destino logístico do material removido e passar a desempenhar função central no próprio processo de descaracterização.

A caracterização geotécnica do rejeito e dos materiais de fundação foi essencial para sustentar tecnicamente a solução adotada, fornecendo base para a definição dos critérios de estabilidade, deformabilidade e trafegabilidade requeridos ao longo da disposição. Da mesma forma, o sequenciamento construtivo mostrou-se decisivo para o desempenho da obra, uma vez que a manutenção de taludes temporários baixos, o tratamento adequado dos acessos, a execução em camadas sucessivas e a gestão hídrica ativa foram condições indispensáveis para compatibilizar segurança geotécnica e viabilidade operacional. Os resultados reforçam, portanto, que o sucesso da disposição mecanizada depende da integração entre projeto, execução e controle de campo.

Por fim, o monitoramento geotécnico confirmou a importância do alteamento progressivo, da preservação da instrumentação e da interpretação contínua do comportamento do depósito ao longo da implantação. As observações de campo e o acompanhamento da performance da disposição evidenciaram que a solução exige ajustes permanentes e leitura técnica integrada das condições de umidade, suporte, drenagem e deformação. Assim, o caso reforça que o uso de cavas pode constituir solução estratégica para a descaracterização de barragens a montante, desde que o rejeito seja realocado para um corpo geotécnico drenado, monitorado e executado sob critérios geotécnicos e operacionais claramente estabelecidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cacciuttolo, C., Castillo, J., Rojas, E. e Molina, R. 2023. *In-Pit Disposal of Mine Tailings for a Sustainable Mine Closure: A Responsible Alternative to Develop Long-Term Green Mining Solutions*. Sustainability, 15(8), 6481.

Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine, J. T. e Lancellotta, R. 1985. *New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils*. Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.

McDonald, L. e Lane, J. C. 2010. *Consolidation of In-Pit Tailings*. Proceedings of Mine Waste 2010.

Mudd, G. M., Smith, H. D., Kyle, G. e Thompson, A. 2011. *In-Pit Tailings: World's Best Practice for Long-Term Management of Tailings*. Proceedings of MetPlant 2011.

Robertson, P. K. e Cabal, K. L. 2022. *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering*.