

18º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental

Eficiência operacional e indicadores de performance relacionados à estabilidade de taludes em uma mina a céu aberto

Alana Conradi Leite ¹; Ana Beatriz Silva Camilo ²

Resumo – A gestão tradicional das operações em minas, especialmente no que se refere à estabilidade de taludes, frequentemente enfrenta desafios relacionados a inconstâncias operacionais. Isso é particularmente evidente em cavas a céu aberto com geologia predominantemente friável, que se tornam vulneráveis, especialmente durante o período chuvoso. Nesse contexto, é comum observar anomalias geotécnicas, como erosões, trincas e movimentos de massa, que podem impactar a gestão de riscos e a eficiência do processo produtivo. Este artigo tem como objetivo apresentar indicadores técnicos operacionais e geotécnicos relacionados à estabilidade de taludes, destacando os casos de sucesso que transformaram a operação dessa mina em uma das mais produtivas do país. Além disso, serão explorados os impactos diretos da estabilidade dos taludes na eficiência operacional, incluindo a redução de paradas inesperadas do processo produtivo e a otimização dos processos de escavação. O artigo também abordará a importância de um planejamento geotécnico sólido e da integração de tecnologias inovadoras, como verificações regulares, manutenções preventivas e inspeções periódicas, para assegurar a segurança e a produtividade nas operações.

Abstract – The traditional management of mining operations, especially regarding slope stability, often faces challenges related to operational inconsistencies. This is particularly evident in open-pit mines with predominantly friable geology, which become vulnerable, especially during the rainy season. In this context, it is common to observe geotechnical anomalies such as erosion, cracks, and mass movements that can impact risk management and the efficiency of the production process. This article aims to present operational and geotechnical technical indicators related to slope stability, highlighting successful cases that have transformed the operation of this mine into one of the most productive in the country. Additionally, the direct impacts of slope stability on operational efficiency will be explored, including the reduction of unexpected production process stoppages and the optimization of excavation processes. The article will also address the importance of solid geotechnical planning and the integration of innovative technologies, such as regular checks, preventive maintenance, and periodic inspections, to ensure safety and productivity in operations.

Palavras-Chave – Eficiência operacional, Estabilidade de taludes, Indicadores de performance.

¹ Geóloga. Vale, Santa Bárbara – Minas Gerais, (31) 99608-2531, alanaconradi@gmail.com

² Engenheira de Minas. Vale, Santa Bárbara – Minas Gerais, (31) 99154-9597, ana_beatriz_camilo@hotmail.com

1. INTRODUÇÃO

Em cavas de litotipos friáveis, o período chuvoso representa um desafio considerável para a performance de taludes, uma vez que intensifica a suscetibilidade a anomalias geotécnicas, como trincas, erosões e rupturas. Essas condições não apenas comprometem a continuidade das operações, mas também afetam diretamente a eficiência do processo produtivo.

Em uma mina autônoma, os caminhões requerem um índice de eficiência consideravelmente elevado para garantir que o processo produtivo não seja comprometido. Anomalias geotécnicas nos taludes, acessos, rampas ou frentes de lavra podem gerar impactos significativos, resultando em paralisações e, conseqüentemente, em grandes perdas. Dada a natureza predominantemente friável da cava, foram desenvolvidos indicadores técnicos operacionais e de performance geotécnica, que têm um impacto direto no processo produtivo da mina.

Esses indicadores são fundamentais para monitorar a estabilidade dos taludes e prever potenciais falhas. Além disso, o plano de gestão de chuvas delinea ações específicas para diferentes áreas de interface, promovendo uma abordagem integrada que fortalece tanto a gestão geotécnica quanto a operacional. Isso resulta em uma operação robusta e eficiente, contribuindo para que esta mina a céu aberto se mantenha entre as mais produtivas do país. A implementação desses indicadores e planos de ação não só melhora a segurança operacional, mas também maximiza a produtividade, garantindo a sustentabilidade das operações a longo prazo.

2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOMECÂNICA

A região de estudo está situada no contexto geológico-estrutural do Sinclinal Gandarela, uma estrutura desenvolvida principalmente sobre unidades do Supergrupo Rio das Velhas e do Supergrupo Minas, na porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero (QF). Essa estrutura caracteriza-se por uma geometria de sinclinal antifórmico reclinado, com flanco sul invertido e vergência para N-NW. O eixo do sinclinal apresenta uma orientação NE-SW, com uma ligeira inflexão para SE na sua porção meridional (Figura 1).

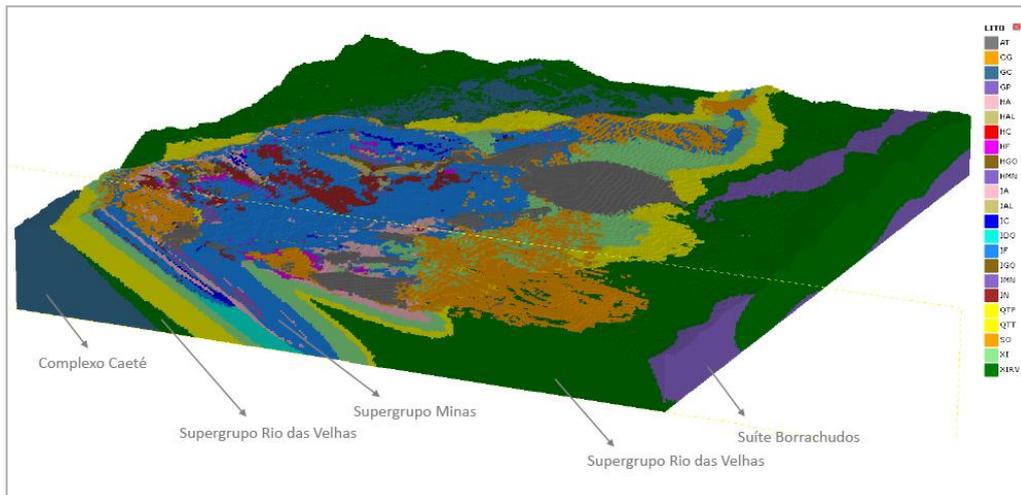


Figura 1. Contexto geológico da região. Fonte: Autores.

A classificação dos maciços da cava em análise é realizada com base na classificação geomecânica Weak Rock, devido à sua baixa resistência. Essa classificação é determinada exclusivamente por esse fator, o qual pode ser aferido em campo por meio de características físicas táteis e visuais, como o golpe do martelo, risco e raspagem com canivete, risco com a unha e pressão manual. A correlação entre as Weak Rocks e o RMR (Bieniawski, 1989), considerando a resistência à compressão uniaxial, está apresentada na Figura 2.



Figura 2: Correlação entre a classificação Weak Rocks e do Rock Mass Rating em função da resistência à compressão uniaxial dos materiais. Fonte: PROC_Classificação_Geomecânica (2019).

De maneira geral, as rochas predominantes na área de estudo são maciços brandos, representados principalmente pelas rochas Very Weak (R1-), amplamente distribuídas na área da cava, com intercalações frequentes das classes Extremely Weak (R0) e Weak (R1+ e R2-) (Figura 3). Os maciços de rocha resistente ocorrem na forma de núcleos alongados na direção NE-SW, sendo compostos majoritariamente por maciços da Classe III, com pequenas porções das Classes II e IV.

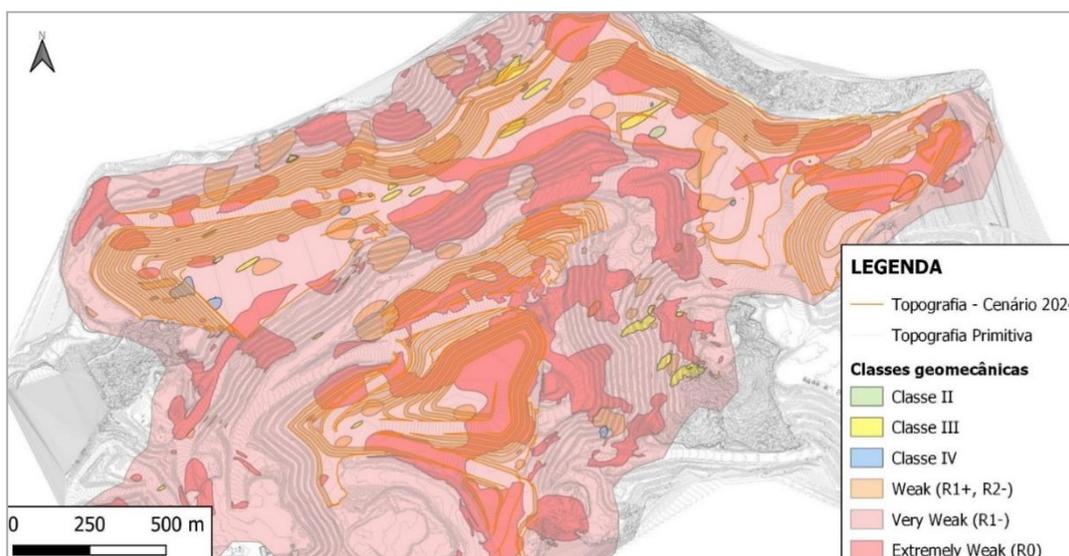


Figura 3: Correlação entre a classificação Weak Rocks e do Rock Mass Rating em função da resistência à compressão uniaxial dos materiais. Fonte: PROC_Classificação_Geomecânica (2019).

3. DESAFIOS GEOTÉCNICOS EM CAVAS DE LITOTIPOS FRIÁVEIS

3.1 FATORES QUE INFLUENCIAM A ESTABILIDADE DOS TALUDES

A estabilidade dos taludes em cavas é resultado da interação de múltiplos fatores. Entre os fatores determinantes para o comportamento dos taludes, destacam-se aspectos relacionados à geologia local, as condições climáticas e aos métodos de escavação empregados.

A geologia local desempenha um fator essencial na estabilidade dos taludes, uma vez que a composição e as estruturas geológicas definem as características mecânicas do maciço rochoso. Litotipos friáveis apresentam baixa coesão e resistência, tornando-os mais suscetíveis a falhas, especialmente em presença de descontinuidades como fraturas, falhas e zonas de cisalhamento. Esses elementos estruturais podem criar zonas de fraqueza que favorecem o desencadeamento de anomalias geotécnicas, como deslizamentos e erosões.

As condições climáticas também exercem influência significativa, sobretudo em períodos de chuvas intensas. A infiltração de água nos taludes provoca a redução da coesão entre partículas e o aumento da pressão dos poros, resultando em perda de resistência ao cisalhamento e aumento do risco de instabilidade. Além disso, a erosão superficial causada pelo escoamento pluvial pode comprometer a integridade das superfícies expostas, agravando os riscos operacionais.

Outro fator relevante é o método de escavação adotado. A geometria dos taludes, incluindo sua inclinação e altura, deve ser cuidadosamente projetada para minimizar esforços adicionais no maciço. Vibrações causadas por desmontes e operações com equipamentos pesados também podem afetar a estabilidade, sobretudo em materiais menos consolidados.

Dessa forma, a interação entre esses fatores exige a adoção de estratégias integradas de monitoramento e mitigação. Indicadores técnicos e planos de gestão específicos para períodos chuvosos têm se mostrado eficazes na previsão de falhas e na manutenção da segurança operacional, contribuindo para a produtividade e a sustentabilidade das operações.

3.2 FATORES QUE INFLUENCIAM A ESTABILIDADE DOS TALUDES

A cava objeto deste estudo dispõe-se como um todo como maciços terrosos de resistência extremamente branda. Estão diretamente relacionados a litotipos friáveis, como rochas intrusivas, xistos, quartzitos, mas sobretudo aos itabiritos e hematitas friáveis que compõem majoritariamente os taludes da cava. Sendo assim, o maior impacto para a gestão de riscos e o processo operacional é durante o período chuvoso, que no Brasil dura cerca de seis meses. Durante esse período, a saturação do solo e o aumento do nível de água nos maciços podem levar a uma série de anomalias geotécnicas que comprometem a estabilidade dos taludes, exigindo atenção especial.

A infiltração de água nas camadas superficiais dos taludes provoca a diminuição da resistência ao cisalhamento do solo, um fator crítico que pode resultar em deslizamentos e rupturas. Além disso, a água acumulada pode gerar anomalias como erosões, rupturas e trincas (Figura 4), que aumentam significativamente os riscos de instabilidade. A erosão, por exemplo, pode remover material da face do talude, criando descontinuidades que favorecem o movimento de massa. Os empoçamentos, por sua vez, geram pressões hidrostáticas que podem atuar contra a integridade da estrutura geotécnica, levando à ruptura.

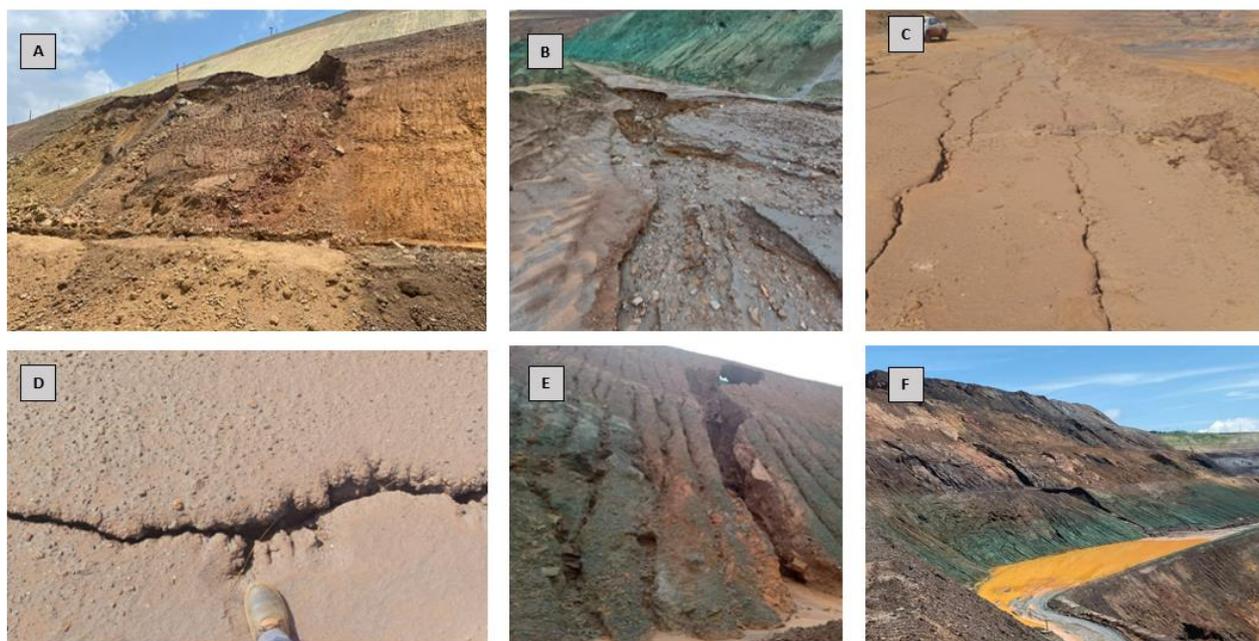


Figura 4: Anomalias geotécnicas comuns em cavas com litotipos friáveis. (A) Ruptura de face; (B) Erosão em bermas; (C e D) Trincas; (E) Erosão em face de talude; (F) Erosão e empoçamento. Fonte: Autores.

A importância do uso da tecnologia associada aos *checks* em campo é fundamental para que o processo operacional se torne cada vez mais produtivo e seguro. Tecnologias como monitoramento remoto, instalação de DHPs (Drenos horizontais profundos) e sistemas de alerta precoce permitem a identificação de anomalias em tempo real, possibilitando intervenções rápidas e eficazes. As anomalias durante o período chuvoso são uma ocorrência comum, mas quando tratadas rapidamente, minimizam a progressão dos problemas e seu impacto no ativo.

Além disso, a implementação de um plano de drenagem eficiente é necessária para mitigar os efeitos adversos da chuva. A drenagem adequada ajuda a controlar o escoamento superficial e

a reduzir a saturação do solo, dando suporte à estabilidade dos taludes. A análise geotécnica dos planos de lavra e indicadores de performance são essenciais para prever o comportamento dos taludes sob condições de chuva, permitindo ajustes no planejamento operacional.

Em suma, os impactos do período chuvoso na estabilidade dos taludes em cavas de litotipos friáveis são significativos e exigem uma gestão proativa e integrada. A combinação de tecnologia avançada, monitoramento contínuo e práticas de gestão de drenagem eficazes é vital para garantir a segurança operacional e a produtividade da mina, reduzindo os riscos associados às condições geotécnicas adversas.

4. INDICADORES DE PERFORMANCE GEOTÉCNICOS

Durante a gestão dos ativos geotécnicos, foram identificadas diversas oportunidades para aprimorar o processo operacional e, assim, evitar anomalias geotécnicas. A partir do plano de lavra, elaborado pelo planejamento de mina e avaliado pela geotecnia operacional, observou-se que a gestão das águas poderia ser iniciada desde o planejamento. Foi proposto, portanto, a implementação de um plano de drenagem que integre adequadamente as drenagens longitudinais e transversais, com aderência geométrica compatível aos parâmetros definidos pela geotecnia, com base nas análises de estabilidade e ensaios laboratoriais. Essa abordagem contribui significativamente para a redução dos riscos associados a novas anomalias geotécnicas e potenciais instabilidades.

Os parâmetros analisados incluem a aderência de drenagem e a aderência geométrica. Na aderência de drenagem, são avaliadas as drenagens transversais e longitudinais (Figura 5A). Já na aderência geométrica, são considerados o ângulo de face, a altura do talude e a largura da berma (Figura 5B). Esses parâmetros são fundamentais para garantir a estabilidade e eficiência do sistema de drenagem, minimizando os riscos de anomalias geotécnicas.

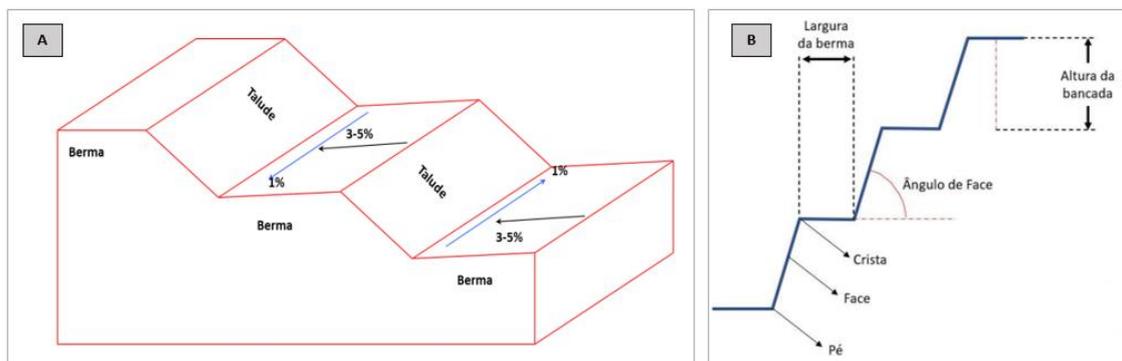


Figura 5: Parâmetros avaliados nos indicadores de performance. (5A) Parâmetros de drenagem e (5B) Parâmetros geométricos. Fonte: VALE.

Após a avaliação geotécnica do plano de lavra, os arquivos são encaminhados para a operação de mina, responsável pela execução do projeto. Na cava em análise, equipamentos de alta tecnologia, equipados com sistemas de precisão, são utilizados para realizar os cortes conforme as especificações do plano. Para garantir a qualidade da execução, é realizado um contracheck, com o objetivo de identificar possíveis desvios. Concluída a etapa da execução, a aderência geotécnica é verificada em áreas que foram concluídas o retaludamento, avaliando-se tanto as drenagens quanto a geometria final, conforme ilustrado nas figuras 6 e 7.

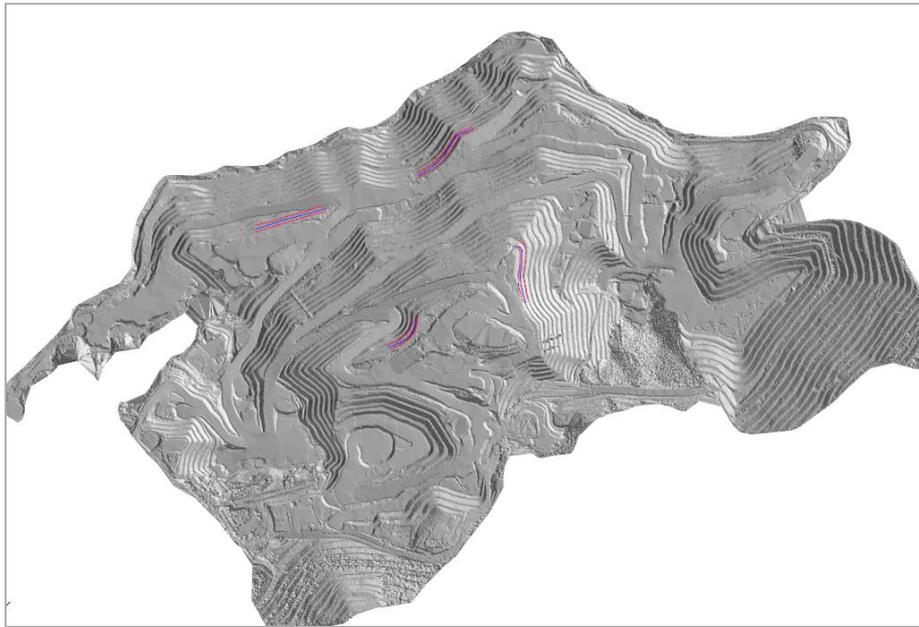


Figura 6: Retaludamento finalizado no período de um mês (em vermelho e azul). Fonte: Autores.

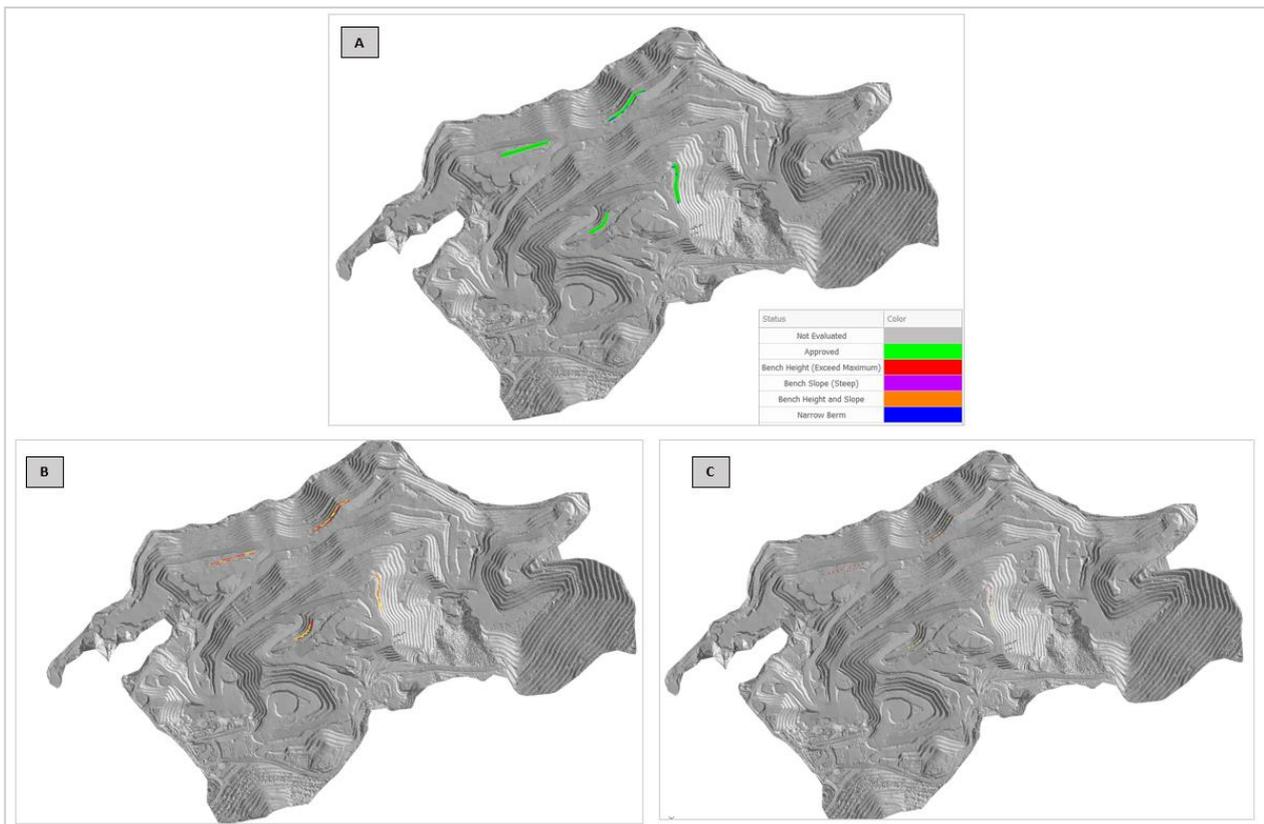


Figura 7: Resultado das aderências geotécnicas. (7A) Aderência geométrica; (7B) Aderência drenagem longitudinal; (7C) Aderência drenagem transversal. Fonte: Autores.

A partir da avaliação da geometria planejada versus a executada, foram estabelecidos indicadores de performance com base nesses parâmetros, os quais são monitorados mensalmente nas reuniões com as áreas de interface. Esses indicadores estão apresentados na figura 8. Em caso de desvios, as questões são encaminhadas para o planejamento e a operação, que realizam as adequações necessárias para garantir a conformidade com o plano original.



Figura 8: Indicador de performance de estabilidade de taludes. Fonte: Autores.

5. EFICIÊNCIA OPERACIONAL

Com a implementação dos indicadores geotécnicos da cava, também foram desenvolvidos indicadores de produção da rota que, em conjunto, promovem uma abordagem baseada nos conceitos de melhoria contínua. O monitoramento constante dos parâmetros mencionados anteriormente assegura que não ocorram anomalias geotécnicas de grande relevância, como empoçamentos nas frentes de lavra ou rupturas que bloqueiem acessos primordiais, como rampas e bermas estratégicas. Essa abordagem permite a rápida identificação de falhas e desvios em cada segmento, viabilizando a tomada de ações corretivas ágeis e precisas para mitigar e resolver os problemas.

No planejamento, foi implementado um monitoramento diário dos indicadores de produção, com o objetivo de detectar e corrigir instabilidades antes que elas impactem os ativos. O conceito tradicionalmente aplicado para assegurar a aderência e o cumprimento da geometria do plano de lavra também é empregado neste contexto, adaptando-se ao conceito de massa de rota (Origem/Frota de Carga/Frota de Transporte/Acesso/Destino), diretamente associado ao indicador de Eficiência Global dos Equipamentos (Overall Equipment Efficiency – OEE). Esse acompanhamento é realizado em conjunto com o plano de produção, utilizando os seguintes indicadores:

- **PNR (Planejado Não Realizado):** Refere-se à massa das rotas programadas que não foram cumpridas.
- **RNP (Realizado Não Programado):** Denota a massa das contingências operadas fora do plano.
- **PR (Planejado Realizado):** Representa a massa que foi realizada conforme o programa.

O método se baseia em três indicadores principais:

- **Índice de Aderência de Movimentação (IAM):** Avalia a massa realizada que não estava programada: $IAM = PR / (PR + RNP) \times 100$;
- **Índice de Cumprimento de Movimentação (ICM):** Avalia a massa programada que não foi realizada: $ICM = PR / (PR + PNR) \times 100$;
- **Índice de Eficiência de Movimentação (IEM):** Consolida os dois indicadores anteriores: $IEM = (IAM + ICM) / 2$.

6. RESULTADOS

A estabilização do processo permitiu um aumento expressivo nos indicadores de desempenho dos ativos, garantindo o alinhamento com os parâmetros produtivos estabelecidos. A seguir, destacam-se alguns dos principais resultados obtidos ao longo desse período:

1. Segurança: Desde a implementação do método, não houve registro de acidentes entre 2022 até o presente momento, evidenciando o compromisso com a segurança e a sustentabilidade das operações.

2. Redução de retrabalho: A adoção de um plano de preparação de período chuvoso robusto, juntamente com o monitoramento dos indicadores de aderência de drenagem e geométricos, resultou na minimização das anomalias na cava. O foco na integridade das frentes de lavra e acessos operacionais, aliado ao acompanhamento contínuo e checagens regulares, garantiu maior estabilidade no processo produtivo e reforçou a segurança da operação. Comparando os cenários da cava e o grau de evolução entre 2022 e 2024 (Figura 9), observa-se uma clara melhoria.

3. Redução de custos operacionais: A implementação de estratégias eficazes resultou em uma economia de 40 milhões de reais nos custos operacionais. Essa redução não apenas fortaleceu a saúde financeira da operação, mas também possibilitou reinvestimentos em melhorias contínuas.

4. Otimização da frota: A operação conseguiu manter o plano de lavra com a redução de quatro caminhões, o que não só gerou economia de recursos, mas também evidenciou a eficácia das melhorias implementadas no processo.

5. Aumento de 35% na capacidade de transporte: Entre 2022 e 2024, a capacidade de transporte foi ampliada em 35%, demonstrando uma melhoria significativa na eficiência operacional e na capacidade de atender à demanda de forma mais eficaz.

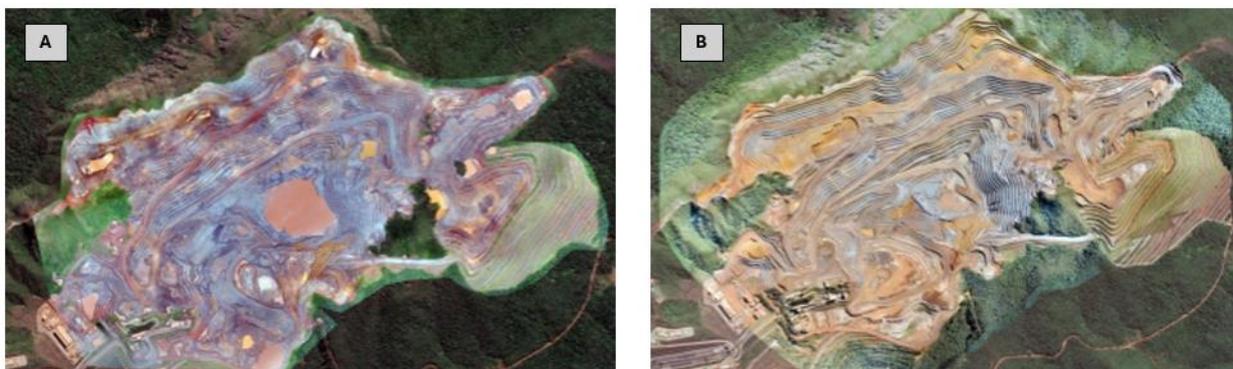


Figura 9: Comparativo da cava após os períodos de chuva do ano de 2022 (10A) e 2024 (10B).
Fonte: Autores.

Esses resultados não apenas validam a eficácia da metodologia adotada, mas também ressaltam o impacto positivo que a estabilização dos processos pode ter em diversos aspectos operacionais, incluindo aumento da segurança, maximização de capacidade produtiva e redução de custos e aumento da segurança. Assim, conseguimos criar um ambiente de trabalho mais eficiente e seguro, alinhado com as metas estratégicas da organização.

7. CONCLUSÃO

A análise realizada ao longo deste estudo destaca a eficácia das ações implementadas para garantir a estabilidade de taludes e otimizar as operações de uma mina à céu aberto. Através de um planejamento geotécnico bem estruturado e da incorporação de tecnologias inovadoras, foi possível alcançar melhorias significativas em vários aspectos operacionais. A redução de retrabalho, a economia de custos e o aumento da capacidade de transporte refletem o sucesso dessa abordagem. Além disso, o foco na segurança e no controle de riscos geotécnicos,

especialmente durante períodos chuvosos, comprovou a importância de uma gestão proativa para garantir a continuidade e o sucesso operacional. Com esses avanços, a mina se consolidou como uma das mais eficientes do país, evidenciando a relevância de estratégias adequadas para superar os desafios geotécnicos e operacionais.

8. REFERÊNCIAS

BIENIAWSKI, Z. T., 1989. Engineering rock mass classification. New York: John Wiley. 248p, 1989.ASTM

PROC_Classificação_Geomecânica_Rev04, 2019. Procedimento VALE para classificação geomecânica. Acesso em: 22 jan. 2025.

J. Lima, 2023. Plano Diretor de drenagem superficial de cavas. Acesso em: 22 jan. 2025.