

Estabilização de Taludes Rochosos com Tela Solta e Reforço de Fundações com Tirantes em Ambiente Industrial de Alta Restrição

Max Gabriel Timo Barbosa

Diretor Técnico, SCO Engenharia Geotécnica, Brasília, Brasil, max.barbosa@sco.eng.br

RESUMO: Este trabalho apresenta as soluções de contenção e reforço aplicadas em taludes rochosos junto a uma instalação industrial, com o objetivo de eliminar riscos de queda de blocos e instabilidade progressiva, sem interferir nas estruturas existentes. Foram estabilizadas três frentes de talude, totalizando mais de 770 m² de área instável, com alturas entre 5 m e 21 m, sujeitas a relaxação de tensões, alteração superficial e degradação das condições confinantes. A ausência de espaço útil e a impossibilidade de contrafortes exigiram soluções ativas. No talude 2, aplicou-se tela solta de aço de alta resistência, ancorada na crista com cabos de aço, para conter blocos de até 1 tonelada. Nos taludes 3 e 4, foi utilizado concreto projetado com fibras metálicas e tela dupla, promovendo travamento superficial. As análises, realizadas no software Slide (Rocscience), indicaram fatores de segurança de 1,57 e 1,63. Adicionalmente, três pilares foram reforçados com vigas atirantadas sobre maciços rochosos, com injeção de calda cimentícia e tirantes passivos e ativos. As intervenções garantiram estabilidade geotécnica da área, mesmo sob chuva e sem paralisação das operações da planta.

PALAVRAS-CHAVE: Talude rochoso, Tela metálica solta, Concreto projetado com fibras, Reforço de fundações, Tirantes.

ABSTRACT: This paper presents containment and reinforcement solutions applied to rock slopes adjacent to an industrial facility, aimed at eliminating the risk of block falls and progressive instability without interfering with existing structures. Three unstable slope faces were treated, totaling over 770 m² of intervention area, with heights ranging from 5 m to 21 m, affected by stress relief, surface weathering, and degradation of confinement conditions. Due to limited space and the impossibility of using buttresses or load relief measures, active stabilization systems were adopted. For slope 2, a high-strength steel mesh system was used, anchored at the crest with steel cables, designed to retain blocks up to 1 ton. For slopes 3 and 4, a layer of shotcrete reinforced with steel fibers and double mesh was applied, promoting surface locking and increased rigidity. Stability analyses using Slide (Rocscience) with the Morgenstern-Price method resulted in safety factors of 1.57 and 1.63. Additionally, three columns adjacent to the slopes were reinforced with anchored beams and grouted rock masses using cementitious injection and passive/active anchors. The interventions restored geotechnical stability even during the rainy season and without interrupting plant operations.

KEYWORDS: Rock slope, wire mesh, Fiber-reinforced shotcrete, Foundation reinforcement, Anchors.

1 INTRODUÇÃO

A estabilidade de taludes rochosos em ambientes industriais operacionais representa um desafio recorrente na engenharia geotécnica aplicada. Além das condições geomecânicas adversas típicas de maciços rochosos expostos às intempéries, os projetos de contenção nessas áreas demandam soluções compatíveis com a continuidade das atividades da planta, acesso restrito a equipamentos de grande porte e interferência mínima sobre estruturas e fundações existentes.

Este artigo apresenta um estudo de caso referente à estabilização emergencial de três frentes de corte rochoso implantadas durante as fases iniciais de implantação de uma planta industrial de beneficiamento mineral, na década de 1980. Essas frentes, localizadas próximas a estruturas críticas como muros de contenção, drenagens e pilares de sustentação, apresentavam feições compatíveis com instabilidades



incipientes e riscos de deslocamento superficial e queda de blocos, agravadas pela exposição prolongada à intempérie, ausência de proteção superficial e perda de confinamento lateral.

A concepção das soluções foi guiada por critérios técnicos, logísticos e operacionais, priorizando intervenções de rápida implantação e elevada confiabilidade estrutural. Devido à impossibilidade de construção de estruturas de contraforte, optou-se por técnicas ativas de contenção e reforço, como telas metálicas de alta resistência, concreto projetado com fibras metálicas, tirantes passivos e ativos, além de reforços locais em fundações de pilares existentes.

As análises de estabilidade foram realizadas por meio de modelagem analítica e computacional com auxílio dos softwares Slide (Rocscience) e MacRo (Maccaferri), contemplando diferentes cenários de carregamento, presença de descontinuidades e condições hidrológicas.

A intervenção foi realizada sem interrupção das atividades da planta e garantiu níveis de segurança compatíveis com os critérios exigidos pelo cliente, preservando o funcionamento da infraestrutura existente e mitigando riscos geotécnicos associados à operação contínua do complexo industrial.

2 CARACTERIZAÇÃO DOS TALUDES E CONCEPÇÃO DAS INTERVENÇÕES

A intervenção geotécnica abordada neste trabalho contemplou a estabilização de três frentes de taludes distintos, além do reforço estrutural de três pilares com características semelhantes de fundação e contenção. Cada frente de talude apresentava geometrias e condições geomecânicas específicas, exigindo abordagens diferenciadas de estabilização, embora fundamentadas em princípios técnicos comuns.

A proximidade imediata de estruturas industriais e sistemas de drenagem, além da limitação de espaço útil na base e na crista dos taludes, impediu a adoção de soluções que envolvessem material de contraforte, bermas ou redistribuição de esforços por alívio geométrico. Nessa condição, optou-se por métodos de contenção ativa, voltados à preservação das tensões confinantes e à coesão superficial dos maciços rochosos, buscando mitigar os riscos de deslocamentos e queda de blocos com segurança e eficiência construtiva (Xanthakos, 1994).

As soluções aplicadas visaram, prioritariamente, o aumento da resistência ao cisalhamento dos maciços, por meio da melhoria da coesão efetiva e do ângulo de atrito interno, sem promover aumentos significativos nas tensões totais que pudessem elevar os momentos atuantes e comprometer a estabilidade geral. Elementos passivos, como tela metálica solta ancorada com cabos de aço, e ativos, como concreto projetado com fibras metálicas e tirantes, foram utilizados conforme o tipo de instabilidade predominante e a acessibilidade local.

Outro critério relevante na concepção foi garantir que as soluções fossem exequíveis em períodos de chuva, uma vez que a programação da obra não permitia interrupções sazonais. Isso exigiu técnicas que não dependessem de solo seco ou de prolongados períodos de cura, como a aplicação de concreto projetado em camadas sucessivas com incorporação de fibras e utilização de grampos curtos para fixação inicial.

Além desses aspectos, também foi considerada a influência da orientação da estratificação do maciço de folhelho. As inspeções geológicas revelaram que o mergulho das camadas era contrário à face dos taludes, condição que implica em instabilidade cinemática nula (Hoek & Bray, 1981). Dessa forma, descartaram-se mecanismos clássicos de ruptura plana, em cunha ou tombamento, restando como principais riscos a desagregação superficial e a queda de blocos isolados. Essa caracterização justificou a escolha por soluções superficiais de proteção e reforço, como concreto projetado e telas metálicas, priorizando a preservação das tensões confinantes e a mitigação de desprendimentos localizados.

Do ponto de vista geológico-geotécnico, as investigações disponíveis consistiam em sondagens mistas (rotativas e SPT), porém sem ensaios laboratoriais de resistência ao cisalhamento. Para definição dos parâmetros de projeto, recorreu-se a correlações empíricas amplamente consolidadas na literatura, como as propostas por Hoek & Bray (1981), Briaud (2013), Verbrugge & Schroeder (2018), além de dados comparativos do banco interno da empresa, previamente calibrado em obras com geologia semelhante.

A combinação entre pragmatismo executivo, restrições operacionais e fundamentos geotécnicos sólidos orientou o desenvolvimento das soluções apresentadas, assegurando a estabilidade das frentes intervenientes sem interferência nas edificações existentes e com plena aderência às necessidades de segurança da operação industrial. A situação anterior às intervenções pode ser vista nas Figuras 1 a 3,



Figura 1. Talude setor 2, em que foi utilizado o sistema de tela solta, abrangendo uma área estimada de 462 m² (altura de 21 m por 22 m de comprimento).



Figura 2. – No topo do talude 2, foi observado o deslizamento de material rochoso próximo a base do pilar P16, indicado sobrejacente a trecho do talude 2, que teve sua base reforçada e recomposta com aplicação de concreto projetado com fibras

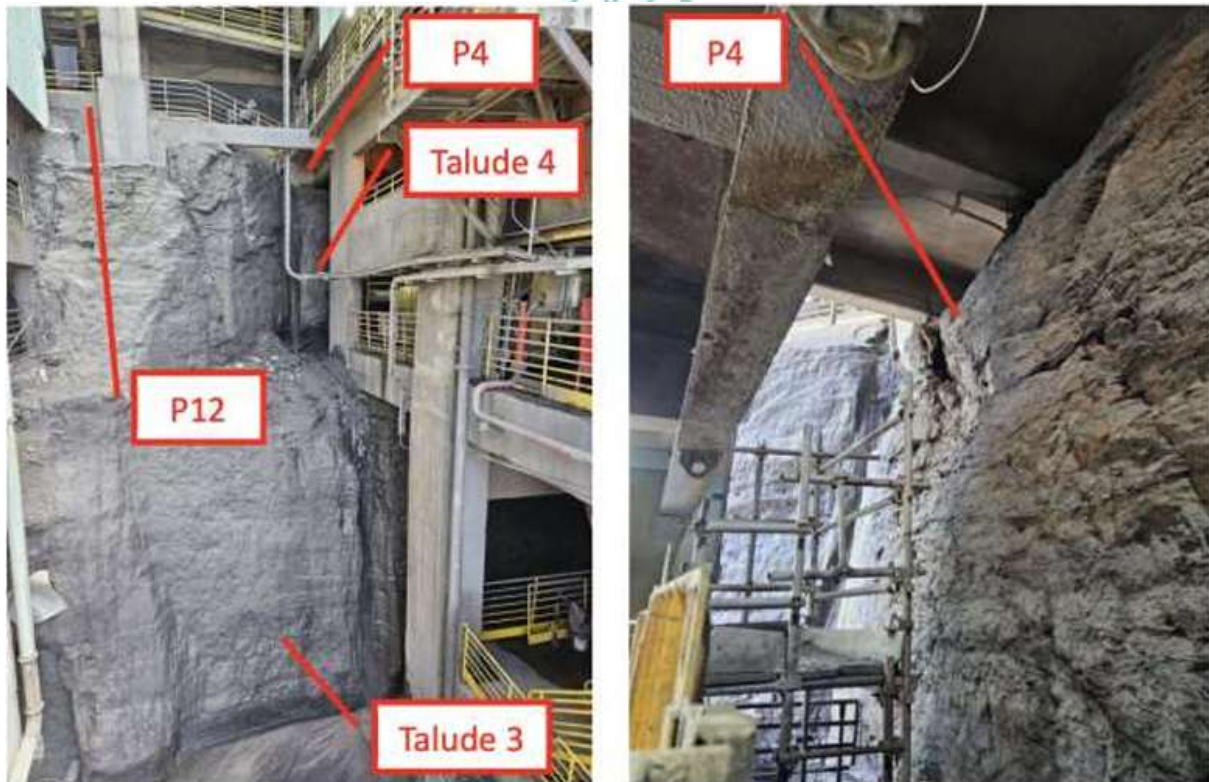


Figura 3. Taludes 3 e 4, em que o Talude 3 estende-se por 12 m de comprimento x 9 m de altura, com área total = 108m² e o Talude 4 estende-se por 40,00m de comprimento x 5,00m de altura, com área total = 200 m². Ambos os taludes foram contidos com aplicação de microconcreto projetado com fibras. Os pilares P4 e P12 também tiveram sua base reforçada e recomposta com aplicação de concreto projetado com fibras

3 METODOLOGIA DE ANÁLISE

A metodologia adotada neste estudo consistiu na combinação de inspeções geotécnicas detalhadas, modelagem computacional com ferramentas de equilíbrio limite e dimensionamento técnico com foco na viabilidade operacional e eficácia estrutural das soluções. O objetivo foi garantir a estabilização de taludes e fundações adjacentes em uma planta de beneficiamento mineral, sem comprometer o funcionamento das instalações e respeitando restrições geométricas severas.

3.1 Levantamento de Campo e Diagnóstico Geotécnico

O trabalho foi iniciado com inspeções visuais detalhadas das frentes de talude, realizadas por equipe técnica especializada, com apoio de registros fotográficos e escaladores industriais, dada a altura dos taludes (variando entre 5 m e 21 m) e a presença de blocos soltos com massas superiores a 1 tonelada. O objetivo foi identificar zonas críticas de instabilidade, feições estruturais como fraturas, diaclasamentos e planos de descontinuidade, bem como evidências de alterações superficiais e deslocamentos (Barton & Choubey, 1977).

As investigações geotécnicas diretas foram limitadas à campanha de sondagens mistas disponibilizada pela contratante, sem ensaios de cisalhamento direto. Para contornar essa limitação, foram utilizadas correlações empíricas para estimativa de parâmetros de resistência ao cisalhamento, com base no número de golpes SPT, grau de alteração do maciço e sua classificação litológica. Os parâmetros de resistência foram inferidos com base nas metodologias de Hoek & Bray (1981), Briaud (2013), Verbrugge & Schroeder (2018), além de dados históricos do banco de dados geotécnicos da empresa executora, que possui base parametrizada para contextos geológicos semelhantes.

É importante esclarecer que, apesar da ausência de trechos espessos de solo nos taludes analisados, as correlações empíricas com base em SPT foram utilizadas apenas como suporte preliminar para estimar valores conservadores de resistência em zonas de alteração e saprolitização localizadas, especialmente junto às descontinuidades. A caracterização principal considerou o maciço rochoso de folhelho, definido a partir



das inspeções visuais e da orientação das camadas. Dessa forma, os parâmetros adotados foram validados de forma qualitativa frente ao contexto geológico observado, evitando a superestimação da resistência.

3.2 Condições de Contorno e Premissas de Projeto

A concepção das soluções foi condicionada por três fatores principais:

- (a) a impossibilidade de uso de estruturas de contraforte ou aterramento por falta de espaço útil;
- (b) a necessidade de execução segura durante o período chuvoso; e
- (c) a manutenção da operação contínua da planta industrial durante toda a execução.

Além disso, a geometria dos taludes apresentava inclinações elevadas, ausência de bermas e presença de estruturas industriais próximas à crista e ao pé do talude, o que impôs a necessidade de soluções ativas, de rápida instalação e mínima intervenção física.

3.3 Dimensionamento das Soluções de CONTENÇÃO e REFORÇO

As soluções aplicadas variaram conforme a gravidade da instabilidade identificada e as características do maciço rochoso:

- **Talude 2:** Aplicou-se contenção com **tela metálica de alta resistência ancorada com cabos de aço na crista**, formando um sistema de barreira de retenção para blocos instáveis. O objetivo era conter blocos potencialmente mobilizáveis sem a necessidade de projeção de concreto, mantendo a flexibilidade do sistema.
- **Taludes 3 e 4:** Foram estabilizados com **concreto projetado armado com fibras metálicas**, aplicado sobre tela dupla e grampeamento superficial passivo. Essa solução promoveu o travamento superficial do maciço e o aumento da coesão aparente, conferindo maior integridade ao paramento do talude. O uso de fibras metálicas melhorou a resistência à tração e a durabilidade da camada de revestimento.
- **Pilares comprometidos:** Localizados em área de fundação instável, foram reforçados com **vigas de transferência atirantadas** sobre rocha sã, com injeção de calda cimentícia em perfurações profundas. Foram utilizados **tirantes passivos e ativos**, com protensão inicial de controle, para mitigar o risco de recalque diferencial e garantir estabilidade ao sistema estrutural.

3.4 Modelagem Computacional e Avaliação da Estabilidade

Embora o mecanismo predominante de instabilidade identificado tenha sido a queda de blocos isolados em folhelho, optou-se por complementar a análise com modelagem em equilíbrio limite (Morgenstern-Price). Essa escolha teve caráter conservador, permitindo verificar cenários globais de instabilidade que, embora pouco prováveis no contexto cinemático (mergulho das camadas contrário à face do talude), poderiam comprometer a estabilidade geral em caso de saturação ou perda localizada de resistência. Assim, a modelagem serviu como uma ferramenta de apoio para definir espessuras mínimas de concreto projetado e a necessidade de reforços localizados, não substituindo a avaliação cinemática baseada em inspeção estrutural das descontinuidades.

Para validar as soluções e garantir fatores de segurança adequados, os taludes foram modelados no software Slide (versão 7.0, Rocscience, 2019), utilizando o método de equilíbrio limite de Morgenstern-Price. O talude 2 foi analisado por meio do software MacRo2, que utiliza o método do equilíbrio limite (MEL) associado às equações de Muhunthan et al. (2005). O modelo considerou:

- Estratigrafia simplificada com camadas de rocha alterada e intacta;
- Como havia ausência de dados confiáveis acerca do peso específico do maciço rochoso local, bem como sua resistência ao cisalhamento, assumiu-se para cálculo da estabilidade do talude que o peso específico fosse majorado, para rocha sedimentar, com valores mínimos de ângulo de atrito e coesão, conforme sugerido por Hoek & Bray (1981), conforme Tabela 1;
- Ação das forças de contenção (tirantes e peso do concreto projetado) representadas como vetores distribuídos;
- Níveis de lençol freático para cenários críticos, com poropressão estimada com base em dados históricos de chuvas locais.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos de resistência utilizados nos taludes 3 e 4

Feição geológica	γ (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ' (°)
Rocha Sedimentar	26,0	50,0	35
Frágil			

Os fatores de segurança obtidos após as intervenções foram de **1,57** e **1,63** para os taludes 3 e 4, respectivamente, mesmo sob condição saturada, o que confirmou a eficácia técnica das soluções propostas. As Figuras 4 e 5 ilustram os parâmetros utilizados e os resultados obtidos, respectivamente.

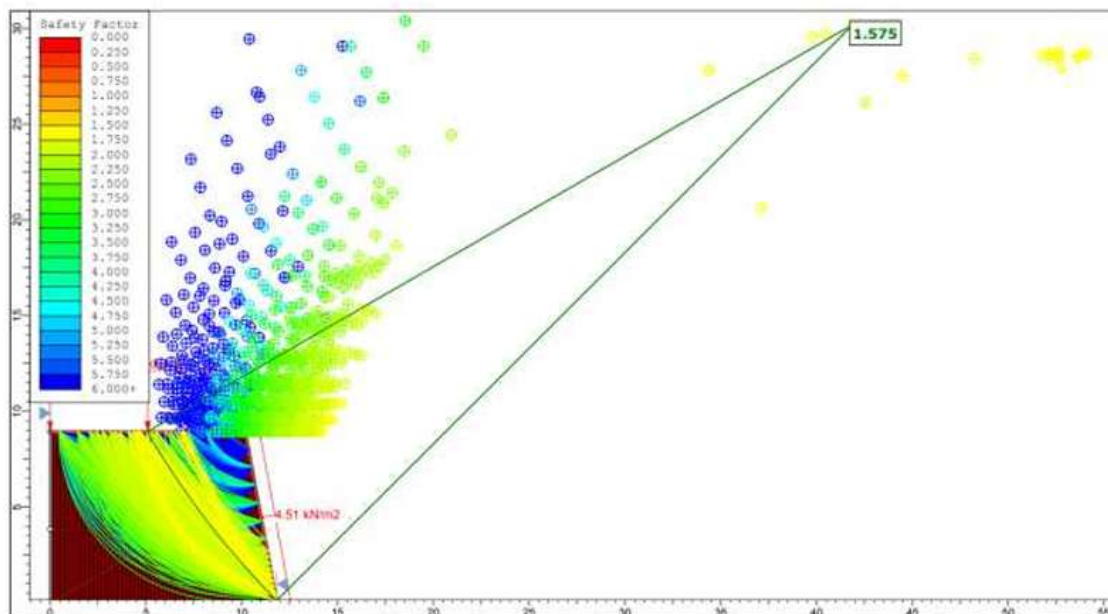


Figura 4. Estabilidade do talude 3 após intervenção com concreto projetado reforçado com fibras, FS = 1,575, acima do mínimo de 1,5 recomendado pela NBR 11682/2009.

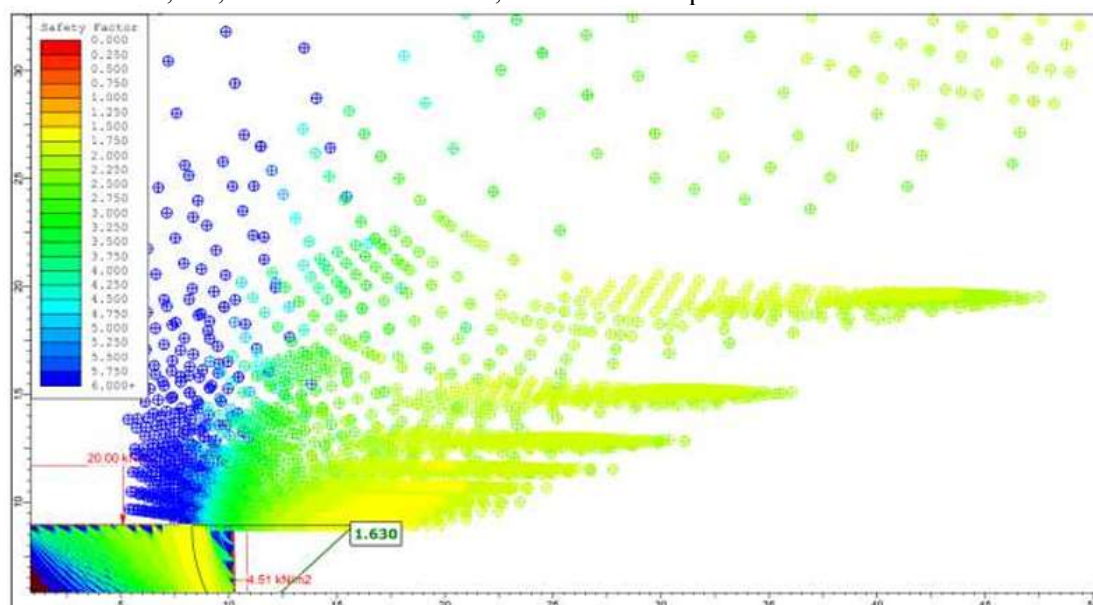


Figura 5. Estabilidade do talude 4 após intervenção com concreto projetado reforçado com fibras, FS = 1,630, acima do mínimo de 1,5 recomendado pela NBR 11682/2009.

3.5 Avaliação Integrada e Viabilidade Operacional

A escolha dos métodos executivos privilegiou técnicas com baixo impacto logístico, como bombeamento de concreto projetado a partir da base do talude, uso de plataformas elevatórias, acesso por cordas e cabos com sistema de ancoragem mecânica e química. O cronograma foi mantido dentro do período previsto, mesmo com chuvas esparsas, devido à capacidade de execução contínua das frentes de serviço.

Durante a execução, foram realizados controles de qualidade da aplicação de concreto, testes de arrancamento em grampões selecionados, e monitoramento visual diário das áreas tratadas, garantindo rastreabilidade e desempenho conforme o projeto.

4 RESULTADO DAS INTERVENÇÕES

As soluções implementadas nas três frentes de talude resultaram em melhoria significativa das condições de estabilidade local, promovendo segurança operacional à planta industrial e eliminando riscos iminentes de desprendimento de blocos rochosos. A seguir, são apresentados os principais resultados observados, por talude.

4.1 Talude 2

A contenção com tela metálica de alta resistência ancorada com cabos demonstrou desempenho eficaz na retenção de blocos instáveis, principalmente em setores com relevo acentuado e presença de vegetação superficial, conforme observado na Figura 6. A geometria do sistema permitiu adaptação às irregularidades do paramento, garantindo aderência e comportamento flexível mesmo após chuvas intensas.



Figura 6. Vista de deslocamento de rocha contido pela solução de tela metálica.

4.2 Taludes 3 e 4

Para os Taludes 3 e 4, a solução de camada contínua de concreto projetado com fibras metálicas, sobreposta a um sistema de tela dupla com espaçadores, permitiu contenção eficiente das fraturas e juntas abertas, promovendo o travamento de blocos e evitando a progressão de falhas superficiais.

Ambos os taludes apresentaram comportamento satisfatório após a execução da obra, sem manifestações de fissuras, delaminação do concreto ou deslocamentos detectáveis pelos marcos prismáticos instalados ao longo da crista dos taludes. A Figura 7 ilustra a vista geral da área contida nos taludes 3 e 4, bem como ao reforço do pilar P12 e P4.

4.3 Reforço de pilares

Os três pilares localizados na base dos taludes foram reforçados com vigas atirantadas sobre rocha sã, proporcionando estabilidade adicional às estruturas de fundação. Ensaios de pré-tracionamento confirmaram o desempenho dos tirantes e a uniformidade da transferência de carga.

Essas intervenções permitiram a liberação da área para operação contínua, sem restrições adicionais.



Figura 7. Vista de frente dos taludes 3 e 4 e dos pilares P12 e P4 após intervenção

5 CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou a viabilidade técnica e operacional de aplicar soluções de contenção ativas em taludes rochosos industriais, mesmo sob severas restrições geométricas e operacionais. A integração de inspeções detalhadas, parâmetros inferidos da literatura e banco técnico da projetista, além de modelagem computacional criteriosa, permitiu a escolha de técnicas adaptadas a cada frente de serviço.

As soluções com tela metálica ancorada e concreto projetado com fibras metálicas se mostraram adequadas aos diferentes níveis de instabilidade presentes, sendo efetivas na eliminação do risco de queda de blocos, mesmo durante o período chuvoso. O reforço de pilares por meio de tirantes e vigas de travamento complementou o sistema de estabilidade geral da área.

O caso apresentado reforça a importância de soluções geotécnicas customizadas, baseadas em diagnóstico técnico realista e compatível com as restrições do empreendimento, bem como como o método observacional pode ainda ser útil em obras de contenção. Além disso, as práticas aqui descritas se encontram alinhadas com recomendações consolidadas internacionalmente para contenção de taludes e obras subterrâneas (AFTES, 1991), o que reforça a validade técnica da abordagem aplicada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFTES (1991). *Recommendations on grouting for underground works*. Tunnelling and Underground Space Technology, 6(4), 383–461.
- Barton, N.; Choubey, V. (1977). *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock Mechanics, 10, 1–54.
- Briaud, J. L. (2013). *Geotechnical engineering: unsaturated and saturated soils*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons. 1022 p.
- Hoek, E.; Bray, J. W. (1981). *Rock slope engineering*. London: Institute of Mining and Metallurgy.
- Muhunthan, B.; Shu, S.; Sasiharan, N.; Hattamleh, O. A.; Badger, T. C.; Lowell, S. M.; Duffy, J. D. (2005). Analysis and design of wire mesh/cable net slope protection – Final Research Report WA-RD 612.1. Department of Transportation/U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.
- Rocscience (2019). Slide v7.0 – Limit Equilibrium Slope Stability Analysis. Toronto: Rocscience Inc.
- Verbrugge, J.; Schroeder, C. (2018). *Geotechnical correlations for soils and rocks*. London Hoboken, NJ: ISTE Ltd Wiley. 218 p.
- Xanthakos, P. P. (1994). *Ground control and improvement*. Hoboken: John Wiley & Sons.