

Estabilização de Taludes com Solo Grampeado em Área de Proteção Ambiental com Sinais de Ruptura Progressiva

Max Gabriel Timo Barbosa

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

RESUMO: Este trabalho apresenta a estabilização de taludes com sinais de instabilidade iminente, identificados por trincas de tração plástica com aberturas entre 25 mm e 75 mm e desníveis de até 50 mm. Os taludes, com parte localizados em área de proteção ambiental, possuíam geometria em bancada dupla na área de mina, inclinação de 45° e alturas entre 8 e 11 metros, com inclinação média de 30° e altura de 28 metros na área de proteção ambiental, além de indícios de ruptura superficial agravada por infiltração em períodos chuvosos. As análises indicaram fatores de segurança inferiores a 1,0 em diversos trechos. A solução adotada foi o solo grampeado com grampos reinjetáveis, associando paramento em concreto projetado armado na área de mina e paramento flexível na área de proteção ambiental. O dimensionamento foi realizado via método de Morgenstern-Price no software Slide 2D, com três seções críticas e parâmetros obtidos por correlações empíricas e acervo técnico. A execução incluiu perfuração com lavagem à água, grampos com reinjeções setorizadas, controle por gráficos isovolumétricos e concreto projetado via úmida ($f_{ck} = 30$ MPa). O fator de segurança mínimo adotado foi 1,5 (NBR 11682/2009). A experiência reforça práticas eficazes em contenções de maciços heterogêneos com sinais de ruptura progressiva e restrições ambientais.

PALAVRAS-CHAVE: Solo grampeado, Estabilidade de taludes, contenção de encostas, Reinjeção setorizada, remediação de áreas degradadas.

ABSTRACT: This paper presents the stabilization of slopes showing imminent instability, evidenced by plastic tension cracks with openings from 25 mm to 75 mm and level differences up to 50 mm along the fissure edges. The slopes, partially located in an environmental protection area, featured dual-bench geometry with 45° inclination and heights between 8 and 11 meters, with signs of superficial failure worsened by rainfall infiltration. Geotechnical analyses indicated safety factors below 1.0 in several sections. The adopted solution involved soil nailing with re-injectable nails, combining a shotcrete facing in the mining area and a flexible facing in the protected zone. The design was developed using the Morgenstern-Price method through Slide 2D software, considering three critical sections with parameters obtained via empirical correlations and technical records. Execution involved water-flush drilling, sectorized nail reinjections, volume and pressure control through isovolumetric graphs, and wet-mix shotcrete with a compressive strength of 30 MPa. A minimum safety factor of 1.5 was adopted, according to Brazilian standard NBR 11682/2009. This case contributes to the advancement of effective practices for slope stabilization in heterogeneous masses with progressive failure indicators and strict environmental constraints.

KEYWORDS: Soil nailing, Slope stability, Slope stabilization, Sectorized reinjection, Remediation of degraded areas.

1 INTRODUÇÃO

A instabilidade de taludes e encostas representa um desafio recorrente na engenharia geotécnica, especialmente em regiões tropicais sujeitas a períodos chuvosos intensos, como o norte do Brasil. Nesses ambientes, a combinação de processos erosivos, saturação do solo e intervenções humanas sem controle técnico adequado pode acelerar a degradação superficial e evoluir para quadros de ruptura progressiva. Quando se trata de áreas com restrições ambientais, como Áreas de Proteção Permanente (APP), a complexidade se intensifica: as soluções devem conciliar eficácia técnica com impacto mínimo ao meio ambiente e à paisagem.



No caso tratado neste trabalho, os taludes apresentavam sinais evidentes de instabilidade iminente, incluindo trincas de tração com abertura de até 75 mm, deslizamentos localizados e indícios de movimentações associadas à infiltração pluvial. Os perfis geotécnicos obtidos por sondagens indicaram a presença de uma camada superficial de colúvio, sobreposta por solos residuais de natureza silto-argilosa a arenosa, com transição para saprólito. Apesar da ausência de nível freático identificado, o histórico de chuvas e a morfologia do terreno sugerem a ocorrência de percolações sazonais, intensificando a perda de coesão dos horizontes mais superficiais.

Nesse contexto, a técnica de solo grampeado mostrou-se adequada tanto pelas suas características de flexibilidade e adaptação a diferentes geometrias, quanto pela possibilidade de ser aplicada com diferentes tipos de paramento — incluindo soluções permeáveis em áreas de restrição ambiental e soluções em concreto projetado armado em áreas industriais. Além disso, trata-se de uma técnica que permite execução com impacto reduzido à vegetação existente e com bons resultados em maciços heterogêneos, desde que dimensionada e executada com rigor técnico.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar a concepção, dimensionamento e execução de obras de contenção com solo grampeado em taludes com sinais de ruptura progressiva, respeitando os condicionantes ambientais, otimizando os recursos técnicos disponíveis e promovendo a estabilidade geotécnica da área. Busca-se, com isso, contribuir para a disseminação de boas práticas em projetos de estabilização de encostas em áreas sensíveis ou degradadas.

2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

O setor estudado apresenta taludes com geometrias distintas, tanto em relação à inclinação quanto à altura, devido à sua extensão ao longo de uma área de transição entre zona de exploração mineral e área de proteção ambiental. Na área de mina, os taludes possuem geometria em bancada dupla, inclinação de 45° e alturas variando entre 8 m e 11 m, com frente de serviço sujeita à movimentação de veículos pesados. Já na área de proteção ambiental, o maciço possui geometria contínua, com altura total aproximada de 28 m e inclinação média de 30°, em um setor onde a intervenção deveria preservar a capacidade de infiltração natural, sem prejuízo à vegetação remanescente.

Os levantamentos geotécnicos disponíveis incluíram quatro sondagens com SPT (SP-6038, SP-6039, SP-6093 e SM-6058), inspeções visuais em campo e registros fotográficos de manifestações patológicas como trincas e abatimentos. A partir destes dados, foi possível traçar a seção geotécnica representativa (seção A-A), utilizada para as análises de estabilidade. Destaca-se que a sondagem SM-6058 apresentou resistência à penetração decrescente com a profundidade, sugerindo a presença de colúvios com baixa compactação superficial.

Os perfis de sondagem, de maneira geral, indicam a ocorrência de uma camada superficial de colúvio, seguida por solo residual de composição silto-argilosa a arenosa, e por fim, saprólito com transição para rocha fraturada. Não foi identificado nível freático nas sondagens, embora em inspeções visuais tenham sido observadas marcas de escoamento superficial e zonas com sinais de infiltração sazonal, que provavelmente contribuem para a perda de coesão nos horizontes superiores. A Figura 1 ilustra a localização das sondagens e a Figura 2 o corte com a descrição destas.

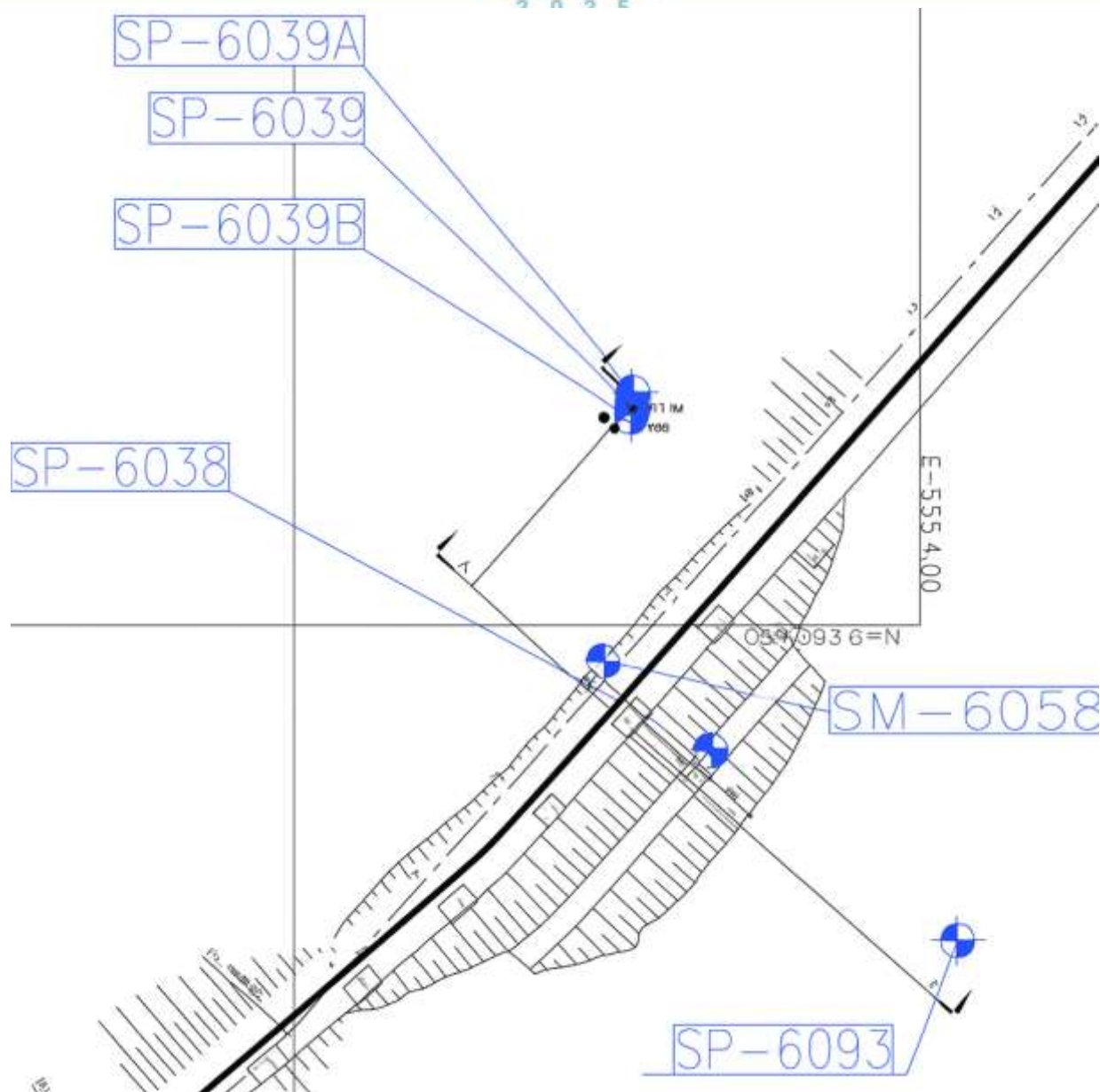


Figura 1. Sondagens da região de interesse e marcação da seção transversal crítica.

Para isso, foi incrementada mediante a combinação do aumento da coesão efetiva (c') e do ângulo de atrito (ϕ'), com a redução da poropressão (u_x) através de elementos drenantes superficiais (barbacãs), profundos (drenos horizontais profundos) e impermeabilização do paramento, de forma a garantir a hipótese



de maciço drenado. A elevação das tensões totais (σ) foi evitada, uma vez que tal estratégia também ampliaria os momentos atuantes.

A partir dessas premissas e das condições de contorno da obra — restrições ambientais, período chuvoso e ausência de dados triaxiais — optou-se pelo uso da técnica de solo grampeado com grampos reinjetáveis e paramentos diferenciados: paramento em concreto projetado armado na área operacional e paramento flexível na área de proteção ambiental. O sistema contemplou ainda controle volumétrico da reinjeção de calda nos grampos.

O dimensionamento foi realizado utilizando o método de Morgenstern-Price no software Slide, da RocScience, que permite avaliação rigorosa das superfícies potenciais de ruptura e da interação com os elementos de reforço. Foram adotados os perfis e topografia da área, simulando perfeito funcionamento dos dispositivos de drenagem e impermeabilização.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros geotécnicos adotados nas análises de estabilidade e a Tabela 2 dos grampos empregados, com base em correlações empíricas da literatura (Briaud, 2013; Verbrugge & Schroeder, 2018) e no acervo técnico, considerando situações de ausência de dados diretos de cisalhamento. Os valores da resistência ao arrancamento foram obtidos por meio da correlação semiempírica de Barbosa et al. (2022), com fator de segurança de 1,7 para a correlação.

Tabela 1. Intervalo de parâmetros utilizados

Solo	Peso Específico (kN/m ³)	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	q_{sr} (kPa)
Colúvio	17-20	5-15	22-25	118
Solo residual	16-19	10-25	29-32	134
Saprólito	19-22	15-35	32-35	165

Tabela 2 – Características dos grampos utilizados

Parâmetro	Valor
Carga máxima da barra	135 kN
Diâmetro da barra	20 mm
Diâmetro do furo	75 mm
Inclinação típica (em relação à horizontal)	15°

Conforme a NBR 11682/2009, foi adotada sobrecarga acidental de 20 kPa sobre os patamares, com fator de segurança mínimo global de 1,50 para condições de médio risco à vida humana e alto risco ambiental. A partir da modelagem numérica, foi identificada a seção crítica: A-A, conforme visto na Figura 2. Os modelos de reforço foram otimizados de modo a atender os critérios normativos de segurança com o menor número de linhas de grampos possível, garantindo eficiência técnico-econômica. O paramento projetado consistiu em concreto projetado com f_{ck} de 30 MPa e espessura de 12 cm, com armadura em malha Q283, resultando em fator de segurança global de 1,586, satisfatório para os fins analisados.

Além da modelagem numérica realizada, é relevante destacar que os valores obtidos de fator de segurança e resistência ao arrancamento estão em consonância com diretrizes internacionais e estudos recentes. Plumelle et al. (1990) reportaram fatores de segurança globais típicos de 1,5 a 1,7 em taludes grampeados em solos residuais, enquanto Lazarte et al. (2015) apresentam compilações de casos na América do Norte com desempenho satisfatório mesmo em maciços heterogêneos, reforçando a aplicabilidade da técnica em condições de incerteza geotécnica. Adicionalmente, Teixeira (1996), confirma que correlações empíricas entre SPT e resistência ao cisalhamento são adequadas quando não há ensaios triaxiais disponíveis, desde que associadas a fatores de segurança mais conservadores, como adotado neste projeto. Dessa forma, a solução proposta está alinhada ao estado da prática nacional e internacional, consolidando sua fundamentação técnica.

4 EXECUÇÃO DAS INTERVENÇÕES

A execução das obras de contenção no Talude 47 foi realizada respeitando as diretrizes técnicas e operacionais estabelecidas no projeto executivo, com atenção às particularidades geomorfológicas e ambientais do local.

O talude foi subdividido em três segmentos: superior, intermediário e inferior. As contenções nos segmentos superior e intermediário foram executadas com solo grampeado associado a paramento em concreto projetado armado, com malha de grampos de 1,25 x 4 m de comprimento, numa área de 3250 m². Já o talude inferior recebeu solução com solo grampeado e paramento flexível tipo MacMat R1, com malha no trecho superior desse talude, com maior presença de colúvio, de 1,5 x 12 m de comprimento e no trecho inferior, de predominância de solo residual e saprólito, com malha de 1,75 x 6 m de comprimento, numa área de 4950 m².

A drenagem foi um dos primeiros aspectos tratados. Considerando-se a ausência de lençol freático nas sondagens mesmo em período chuvoso, optou-se por drenos superficiais do tipo barbacã no concreto projetado, com densidade de 1 unidade a cada 4 m². Contudo, diante da saturação observada no maciço próximo à pista de acesso principal, foram executados drenos horizontais profundos (DHPs) com 12 m de comprimento, espaçados a cada 2,5 m, na base do talude intermediário.

As perfurações dos grampos e drenos foram realizadas de forma manual com equipamento leve (inferior a 30 kg), adequado para operação em taludes inclinados, com ou sem auxílio de skid metálico com sistema de segurança com redundância. Os furos foram perfurados por rotopercussão, com circulação de água, sendo os grampos inclinados a 15° descendentes e os drenos a 5° ascendentes. As perfurações seguiram diâmetro de 75 mm, com previsão de tubos de revestimento em caso de maciço fraturado. Exemplo da execução pode ser visto na Figura 3.



Figura 3. Perfuração de grampos por meio do auxílio de plataforma skid nos taludes da mina

Após a perfuração, procedeu-se à instalação das barras metálicas com 20 mm de diâmetro, tratadas contra corrosão por galvanização e bainha de calda de cimento. Centralizadores garantiram o recobrimento adequado, e tubos de injeção perdidos foram fixados nas barras para permitir reinjeções setorizadas. As ancoragens foram fixadas com placas e porcas nos grampos do trecho inferior, enquanto nas áreas de concreto projetado houve conexão com a armadura do paramento.

A injeção seguiu o procedimento bifásico: inicialmente, realizou-se a bainha com calda de cimento ($a/c \approx 0,5$) com tubo auxiliar removível; após cura mínima de 12 horas, aplicaram-se reinjeções com controle de volume e pressão. Em trechos com grampos longos (> 7 m), realizou-se até três fases de injeção. O controle foi realizado com base em gráficos isovolumétricos e isopressiométricos, permitindo ajustes locais e reforços direcionados.

Ensaio de arrancamento foram conduzidos em 1% dos grampos, conforme boas práticas, a fim de validar a aderência solo-grampo (q_{sr}) assumida no projeto.

A limpeza dos taludes foi feita manualmente após estabilização mínima com DHPs e grampos iniciais, respeitando a integridade vegetal e as condições operacionais. Para taludes com concreto projetado, a limpeza foi concomitante à aplicação da primeira camada de concreto (4 cm). A segunda camada foi aplicada após a fixação da tela metálica Q-283. Ambas as atividades foram executadas com uso de plataformas aéreas ou acesso por corda.

O paramento flexível do talude inferior foi instalado após os grampos estarem posicionados. As telas foram desenroladas da crista, fixadas com placas metálicas e amarradas por alpinistas certificados. O trecho contou com telas em rolos, sobrepostas conforme o projeto executivo. A Figura 4 ilustra a execução no trecho inferior. A Figura 5 ilustra a vista superior após o término das contenções.



Figura 4. Execução de trecho inserido na APP



Figura 5. Talude finalizado, com a vegetação já presente no trecho inferior, executado por meio de paramento flexível

5 CONCLUSÕES

A estabilização dos taludes demonstrou a efetividade da técnica de solo grampeado com reinjeções setorizadas em situações de instabilidade progressiva, especialmente em ambientes com restrições ambientais e operacionais severas.

O uso combinado de grampos com reinjeções multifásicas, drenagem adaptativa e paramentos diferenciados possibilitou atender simultaneamente os critérios de segurança geotécnica, conservação ambiental e continuidade operacional. A segmentação da solução – com paramento rígido em concreto projetado nos trechos críticos e paramento flexível no talude inferior – permitiu otimizar custos e adaptar-se às condições locais.

As análises numéricas, o controle em tempo real das injeções e a aplicação criteriosa das boas práticas de engenharia contribuíram para a obtenção de fatores de segurança superiores a 1,5 em todas as seções críticas, conforme exigido pela NBR 11682/2009.

Por fim, destaca-se que a abordagem adotada reforça a aplicabilidade do solo grampeado em projetos de remediação geotécnica de taludes heterogêneos, com risco de ruptura progressiva, validando seu uso como solução técnica segura, eficiente e ambientalmente integrada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2009). NBR 11682: Estabilidade de taludes. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Barbosa, M. G. T., de Assis, A. P., & da Cunha, R. P. (2022). An innovative post grouting technique for soil nails. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(11), 5539-5546.
- Briaud, J. L. (2013). *Geotechnical engineering: unsaturated and saturated soils*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons. 1022 p.
- CLOUTERRE (1990). *Recommendations Clouterre 1990: Soil Nailing*. Paris: Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Lazarte, C. A., Elias, V., Espinoza, R. D., & Sabatini, P. J. (2015). *Soil Nail Walls Reference Manual – Report No. FHWA-NHI-14-007*. Federal Highway Administration, Washington, DC.
- 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.
- Plumelle, C., Schlosser, F., Delage, P., Knochenmus, G. (1990) French national research project on soil nailing: CLOUTERRE. Geotechnical Special Publication No.25, ASCE, New York; 302p.
- Verbrugge, J.; Schroeder, C. (2018). *Geotechnical correlations for soils and rocks*. London Hoboken, NJ: ISTE Ltd Wiley. 218 p.
- Teixeira, A. H. (1996). Projeto e execução de fundações. Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, SEFE, São Paulo, v.1, p. 33-50.
- Xanthakos, P. P. (1991). *Ground Anchors and Anchored Systems*. New York: John Wiley & Sons.