

Estabilização de Taludes com Solo Grampeado – Estudo de Caso

Michel Moreira Morandini Fontes

Engenheiro, Fontes Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil, michel@fontesgeotecnica.com

Raphael Zanotti do Carmo

Engenheiro, Fontes Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil, raphael.carmo@fontesgeotecnica.com

Bruno Cesar Novais

Geólogo, Fontes Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil, bruno.novais@fontesgeotecnica.com

Fernanda Sasdelli Figueiredo Sales, Fontes Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil,
fernanda.figueiredo@fontesgeotecnica.com

Anderson Nascimento Milagres, Fontes Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil,
anderson.nascimento@fontesgeotecnica.com

RESUMO: A estabilização de taludes com solo grampeado é uma técnica utilizada para prevenir deslizamentos e instabilidades em encostas, sendo uma alternativa usualmente utilizada em estabilidade de taludes em encostas, podendo estar adjacente a canais, vertedouros e demais estruturas hidráulicas que compõe o cenário da mineração. O trabalho possui como objetivo apresentar um estudo de caso utilizando a solução de solo grampeado para estabilização de um talude adjacente a um vertedouro. Para isso, foi realizado uma retroanálise do processo de ruptura associado à realização da interpretação de ensaios de *Dynamic Probing Ligh* (DPL) e a utilização de referências bibliográficas e parâmetros de materiais semelhantes na região a fim de determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo e da rocha. As análises de estabilidade foram conduzidas pelo software Slide 2, da Rocscience. Realizada as avaliações geológico-geotécnicas, identificou-se que a ruptura foi caracterizada por movimentos translacionais de massa devido a mecanismo de deslizamento planar no contato entre o solo residual e saprolito. A solução de estabilização em solo grampeado assegurou o bom funcionamento do vertedouro, contribuindo para os níveis de segurança do barramento principal.

PALAVRAS-CHAVE: Solo grampeado, estabilização, taludes.

ABSTRACT: The stabilization of slopes with soil nail is a technique used to prevent landslides and instability on slopes, being an applicable alternative in the operation and maintenance of canals, spillways and other hydraulic structures that make up the mining landscape. The aim of this work is to detail the solution for stabilizing a slope adjacent to a spillway using soil nail. To this end, a retro-analysis of the rupture process was carried out in conjunction with the interpretation of Dynamic Probing Ligh (DPL) tests and the use of Rocdata software to determine the shear strength parameters of the soil and rock. The stability analyses were carried out using Rocscience's Slide 2 software, which performs limit equilibrium analyses. After carrying out the geological-geotechnical evaluations, it was identified that the rupture was characterized by translational mass movements due to a planar sliding mechanism in the contact between the residual soil and saprolite. The soil nail stabilization solution ensured that the slope functioned properly, contributing to of the main dam safety levels.

KEYWORDS: soil nail, stabilization, slopes

1 INTRODUÇÃO

A estabilidade de taludes pode ser comprometida por uma série de fatores, incluindo a natureza geológica do terreno, os processos de formação do solo ou até mesmo o grau de saturação em que se encontram.

No contexto da mineração e das barragens, os taludes são frequentemente expostos a condições extremas que podem resultar em instabilidades como abatimentos, erosões e escorregamentos.

Uma técnica amplamente empregada para mitigar os riscos associados à instabilidades de taludes é o uso de solo grampeado. Essa abordagem consiste na aplicação de uma série de elementos estruturais, ancorados no solo de forma a contribuir para os esforços resistentes e, dessa forma, estabilizar os taludes no qual são inseridos.

Após intensos eventos chuvosos atípicos ocorridos na primeira semana de janeiro de 2022, algumas erosões/instabilidades deflagraram-se na região do extravasor da área de estudo. Assim sendo, o referido artigo retrata as abordagens utilizadas na proposta de estabilização da área utilizando como solução o emprego de solo grampeado.

De modo a identificar os processos geodinâmicos ocorridos na região, bem como, realizar um mapeamento geológico e estimar parâmetros de resistência, realizou-se uma visita de campo e a execução do ensaio *Dynamic Probing Ligh* (DPL). Os dados observados em campo associado à realização do ensaio DPL permitiu caracterizar as unidades geológicas e estimar os parâmetros de resistência do solo da região.

É importante mencionar que a anomalia observada pode ser resumida em escorregamento no contato solo residual/saprolito do talude de corte situado na região do emboque do extravasor da região de estudo. Sendo assim, após o mapeamento da área e a estimativa de parâmetros de resistência, a solução proposta para estabilização do talude consite na utilização do solo grampeado associado a um sistema de drenagem superficial.

2 METODOLOGIA

2.1 Estudos Geológicos

Foi realizado um mapeamento de campo com 12 estações distribuídos ao longo da área de estudo. Os pontos foram marcados, sobretudo, em locais onde foram observados contatos litológicos, geomecânicos ou a mudança na atitude do principal plano de anisotropia, o qual é dado pela foliação/acamamento.

No que tange aos aspectos geológicos e geotécnicos, buscou-se avaliar, para as unidades terrosas a textura do material, granulometria, compactidade/consistência/resistência, cor e gênese. Já para os maciços rochosos foram avaliados o tipo de rocha (litotipo), cor, textura, granulação/granulometria, os graus de alteração, resistência, fraturamento do maciço, bem como a condição das juntas em termos da abertura, rugosidade, persistência, tipo de preenchimento e grau de alteração da parede. A Figura 1 apresenta a seção de referência para o estudo.

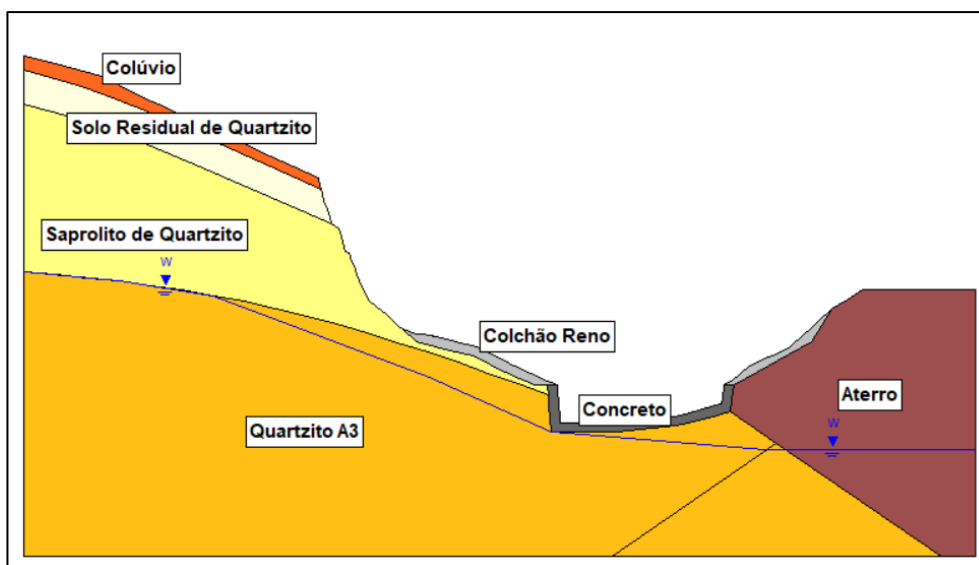


Figura 1. Modelo geológico – Seção de referência

2.2 Estudos Geotécnicos

Para definição dos parâmetros geotécnicos de resistência dos materiais, buscou-se referências técnicas da área da engenharia geotécnica (Hoek e Bray, 1981), bem como, correlações com o resultado dos ensaios DPL. Além disso, utilizou-se como referência parâmetros estabelecidos para materiais semelhantes na região da área de estudo, definidos por meio de ensaios triaxiais. Ademais, o mapeamento geológico e o levantamento de campo foram responsáveis por permitirem a caracterização dos materiais da região. A Tabela 1 resume os parâmetros adotados nas análises de estabilidade.

Tabela 1. Parâmetros de resistência adotados nas análises de estabilidade

Material	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ (°)
Aterro	17,0	4,0	29,5
Colúvio	17,0	11,0	26,0
Solo Residual de Quartzito	17,0	7,0	31,0
Saprolito de Quartzito	20,0	20,0	35,0
Maciço de Quartzito (A3)	22,0	100,0	35,0
Colchão Reno	22,0	0,0	37,0
Concreto Extravasor	24,0	15000,0	30,0

Conforme estabelece a NBR 11682 – Estabilidade de Encostas (2009), é necessário que os taludes analisados apresentem um fator de segurança definido conforme os riscos envolvidos e o grau de segurança esperado, baseado nas possibilidades de perdas de vidas humanas e de perdas materiais e ambientais. Dessa forma, admitiu-se um fator de segurança mínimo de 1,50 uma vez que se considerou nível médio quando relacionado a perdas de vidas humanas, e alto quando relacionado a danos materiais e ambientais.

Adicionalmente, frente ao umedecimento dos taludes e possíveis saturações, devido às águas das chuvas, avaliou-se a elevação da poropressão de água e, conseqüentemente, a perda de resistência do solo com o coeficiente de poropressão R_u . Os valores de poropressão foram simulados a partir do coeficiente de poropressão R_u , estabelecido por Bishop & Morgenstern (1960). Foi adotado R_u de 0,5 para simular condições de saturação, conforme Fredlund & Rahardjo (1993).

3 DIMENSIONAMENTO DO SOLO GRAMPEADO

Os grampos serão engastados nas camadas residual e saprolito de quartzito. Considerando os valores de resistência destes materiais, definiu-se a resistência ao arrancamento (T) dos grampos. Conforme Watkins e Powell (1992), a resistência ao arrancamento Pullout Strength é dada pela equação que segue abaixo

$$T = D * \pi * q_s \quad (1)$$

O valor da adesão solo-grampo foi estimado por meio do valor médio de três correlações empíricas com NSPT, aliadas a um fator de segurança de 2,0. O cálculo foi estimado para a camada de solo residual, considerada a camada mais crítica devido aos parâmetros de resistência e as possíveis superfícies de ruptura. O valor considerado para a camada foi de 6 golpes, corroborado pelos ensaios DPL. A Tabela 2 apresenta os valores calculados da adesão solo-grampo por meio de correlações.

Tabela 2. Adesão solo-grampo no solo grampeado

Método	Q_s (kPa)
Ortigão (1997)	95,00
Orgião et al. (1997)	174,51
Springer (2006)	65,85
Q_s médio	111,77

Dessa forma, considerando o diâmetro do grampo de 0,1 m e o fator de segurança de 2,0, obteve-se uma resistência ao arrancamento de 17,56 kN/m no solo residual. Determinou-se também a resistência à tração da barra de aço inserida na perfuração. Para isso, adotou-se barras de aço CA-50 de diâmetros de 25 mm, considerando a ocorrência de corrosão, adotando uma espessura de sacrifício de 0,6 mm conforme orienta a ABNR NBR 16920-2:2021 para solos naturais e vida útil de 50 anos. Dessa forma, a resistência à tração do aço é dada pela equação abaixo.

$$T = \frac{f_y}{1,15} \cdot A_s = \frac{500000}{1,15} \cdot \left[\frac{\pi \cdot ((25 - 0,6 \cdot 2) \cdot 10^{-3})^2}{4} \right] = 192 \text{ kN} \quad (2)$$

A resistência da placa *Plate Capacity*, é a carga máxima que pode ser sustentada pelo conjunto da placa que conecta o grampo do solo ao talude, sendo considerado como 70% da força de tração máxima do grampo (FHWA, 2015). Dessa forma, adotou-se o valor de 134 kN.

Previu-se o paramento em concreto projetado, dessa forma, a força de tração máxima no paramento T_o é dado pela equação abaixo. Sendo S_v o espaçamento vertical entre grampos e $T_s - \max$ a força de tração máxima nos grampos, obtém-se o valor de tração máxima no paramento de 98,33 kN.

$$T_o = [0,6 + 0,2 \cdot (2 - 1)] \cdot 122 \cong 98,33 \text{ kN} \quad (3)$$

A força máxima resistida pela placa R_{ff} é calculada em função da armadura disponível e da espessura da placa e , a partir disso, é possível calcular a armadura necessária. Considerando um fator de segurança de 1,50, obtém-se uma armadura mínima necessária de 3,75 cm²/m. Dessa forma, adotou-se uma tela eletrosoldada Q396 com área de 3,96 cm²/m. Cabe mencionar que também foi previsto barbacãs na face com a função de drenagem interna e captação de eventuais fluxos no maciço. A Tabela 3 resume as características gerais do solo grampeado proposto.

Tabela 3. Características gerais do solo grampeado

Característica	Valor
Espaçamento vertical dos grampos	2 m
Espaçamento horizontal dos grampos	2 m
Comprimento do grampo	7 m
Diâmetro do grampo	25 mm
Diâmetro do furo	75 mm
Tipo de aço do grampo	CA-50
Inclinação do grampo	15 graus
Espessura do concreto projetado	100 mm
Tela metálica	Q396

4 RESULTADOS OBTIDOS

Após o dimensionamento e modelagem numérica, obteve-se resultados satisfatórios quanto ao fator de segurança do talude após proposta de intervenção com solo grampeado. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos. Já a Figura 2 ilustra a condição atual do talude e a Figura 3 a condição final, após intervenção de reforço.

Tabela 4. Resumo dos fatores de segurança obtidos

FS mínimo	FS condição atual	FS condição reforçada
1,50 (global)	1,41 (global)	1,58 (global)

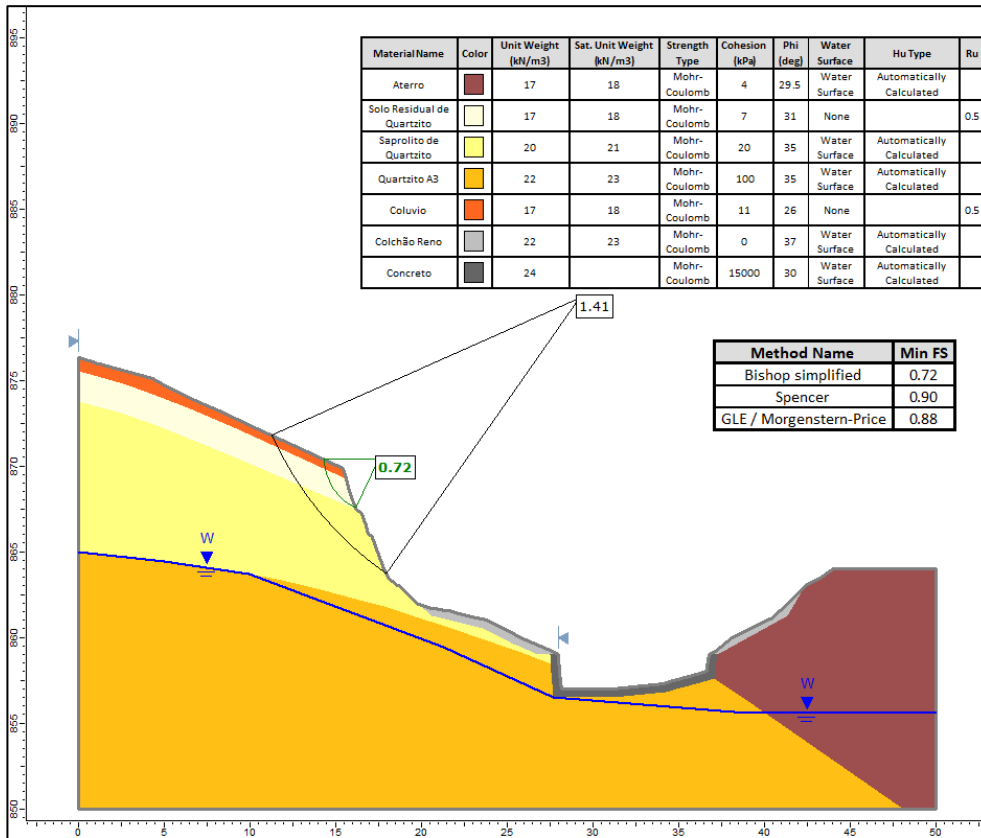


Figura 2. Análise de estabilidade – Condição Atual

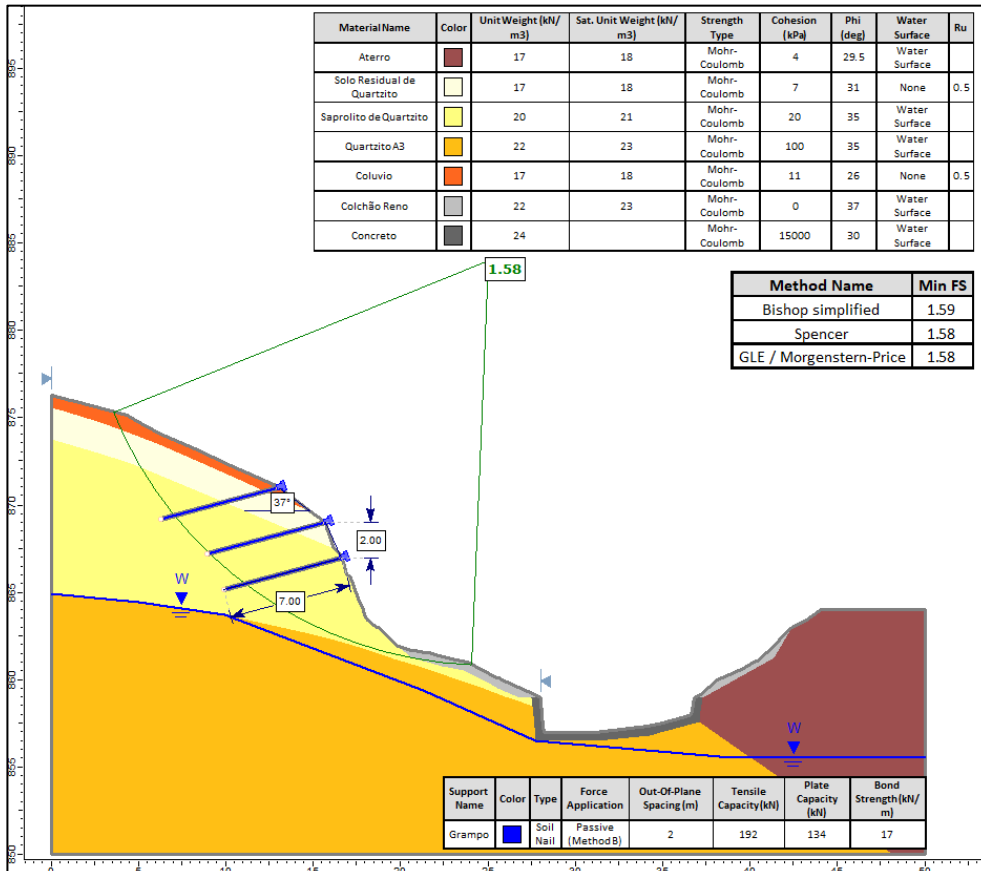


Figura 3. Análise de estabilidade – Condição Reforçada

É importante notar que a solução de reforço em solo grampeado aumentou o fator de segurança global da estrutura em 12%. Além disso, observa-se que superfícies preferenciais de ruptura que ocorriam de forma superficial já estão estabilizadas em função da implantação do solo grampeado e com a estabilização promovida pelo paramento.

5 CONCLUSÃO

A estabilidade de taludes é uma questão crítica em projetos de engenharia civil, especialmente em contextos de mineração e construção de barragens, onde a segurança e a integridade estrutural são prioritárias. Os riscos associados a taludes instáveis, como abatimentos, erosões e escorregamentos, destacam a necessidade de soluções eficazes e confiáveis para mitigar esses perigos. O uso de solo grampeado emergiu como uma técnica proeminente para combater essas ameaças, oferecendo uma forma de reforçar e estabilizar os taludes.

Embora o solo grampeado represente um avanço significativo na técnica de estabilização de taludes, é imperativo que cada projeto seja cuidadosamente analisado e adaptado às condições locais específicas, incluindo a natureza geológica do terreno e o grau de saturação do solo. A implementação bem-sucedida dessa técnica depende de uma compreensão abrangente dos mecanismos de instabilidade e da interação entre os elementos de reforço e o ambiente geológico. Além disso, a inovação contínua e a pesquisa no campo da engenharia geotécnica são essenciais para desenvolver soluções ainda mais eficientes e sustentáveis para o desafio de manter a estabilidade de taludes em cenários de mineração e barragens.

Este trabalho propôs a utilização do solo grampeado como técnica de estabilização de talude adjacente ao sistema extravasor de uma barragem. Os trechos analisados por equilíbrio limite consideraram condição de estabilidade estática e saturação nas camadas de materiais mais superficiais, neste caso, colúvio e solo residual. Essa consideração representou bem as características dos movimentos de massa da região, que geralmente são rasos e em camadas superficiais, provocados devido a uma saturação parcial desses litotipos

A metodologia de solo grampeado ofereceu ao caso benefícios significativos na estabilização do talude, especialmente em contextos geotécnico complexo e sensível. Primeiramente, proporcionou um reforço estrutural considerável, melhorando a estabilidade geral do talude através da introdução de elementos de ancoragem que distribuem as tensões de forma mais equilibrada no solo. Isso reduziu substancialmente o risco de deslizamento e outros tipos de falhas, contribuindo para a segurança do barramento, garantindo a funcionalidade do sistema extravasor.

Além disso, a técnica é relativamente econômica em comparação com outras soluções de estabilização de taludes, uma vez que utiliza materiais e mão-de-obra menos onerosos. A flexibilidade e a adaptabilidade do solo grampeado o tornam apropriado para uma ampla gama de condições geológicas e topográficas, permitindo ajustes conforme as necessidades específicas de cada projeto. Outra vantagem é a rapidez de implementação, que permite uma resposta eficaz em emergências ou quando o tempo é um fator crítico, tornando a referida alternativa o mais adequado ao problema encontrado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de Encostas*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 16920-2. *Muros e taludes em solo reforçado Parte 2: Solos grampeados*. Rio de Janeiro.
- Bishop, Alan. W., Morgenstern, Norbert. (1960) Stability coefficients for earth slopes. *Geotechnique*, vol 10 (4), p.129-153.
- Carlos A et al.,2015, Geotechnical engineering circular no.7 soil nailing wall-reference manual (FHWA-NHI-14-007) U.S. Department of transportation federal highway administration
- Fredlund, Delwyn. G; Rahardjo, Hendry. (1993) *Soil Mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons

Hoek E. and Bray, J.W. 1974. Rock Slope Engineering. London: Instn Min. Metall

Watkins, A.T., Powell, G.E. (1992) Soil nailing to existing slopes as landslip preventive work. *Hong Kong Eng*, vol 20 (4), p.20-27.