

Estabilidade de Taludes por Retroanálise: Um Estudo de Caso no Município de Nova Lima - Minas Gerais

Guilherme de Almeida Silva

Engenheiro Civil, PUC Minas, Belo Horizonte, Brasil, guilhermealmeid@outlook.com

Josias Eduardo Rossi Ladeira

Mestre, Professor de Geotecnia, PUC Minas, Belo Horizonte, Brasil, proqual@uol.com.br

RESUMO: Os escorregamentos de massas de solos são eventos naturais que ocorrem em várias partes do mundo, causando grandes prejuízos financeiros, sociais e perdas de vidas humanas. Esses escorregamentos são influenciados por diversos fatores, tais como as condições geotécnicas do solo e as condições ambientais, como, por exemplo, a pluviosidade acentuada. Portanto, na geotecnia, é sabido que existem vários tipos de rupturas em taludes, os quais devem ser estudados adequadamente para compreender por que essas rupturas ocorrem. O presente trabalho teve como objetivo abordar as condições que levam um maciço terroso à ruptura e compreender os modos de instabilidade que podem ocorrer nessas estruturas formadas por solos, a fim de conduzir a pesquisa necessária para o caso em questão. No estudo de caso, realizado em um talude situado na Rodovia José Francisco da Silva, no bairro Parque Aurilândia, em Nova Lima, Minas Gerais, foram realizadas investigações geotécnicas pelo método de ensaio de campo conhecido como *Standard Penetration Test* (SPT), para determinar a estratigrafia do terreno, e foi utilizada a técnica de retroanálise para determinar os parâmetros geotécnicos que caracterizavam o talude. Com isso, tornou-se possível modelar o maciço do estudo de caso tanto topograficamente quanto geotecnicamente, a fim de dimensionar os métodos de estabilização adequados para o talude em estudo. Após o dimensionamento dos diferentes métodos, foram realizados os orçamentos para verificar o melhor custo-benefício das técnicas de engenharia utilizadas no presente trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Deslizamentos de terra, Geotecnia, Retroanálise, Estabilização de taludes.

ABSTRACT: Landslides are natural events that occur in many parts of the world, causing major financial and social damage and loss of human life. These landslides are influenced by various factors, such as the geotechnical conditions of the soil and environmental conditions, such as heavy rainfall. Therefore, in geotechnics, it is known that there are various types of slope failure, which must be studied properly in order to understand why these failures occur. The aim of this work was to address the conditions that lead an earth mass to rupture and to understand the modes of instability that can occur in these structures formed by soils, in order to conduct the necessary research for the case in question. In the case study, carried out on a slope located on Rodovia José Francisco da Silva, in the Parque Aurilândia neighbourhood, in Nova Lima, Minas Gerais, geotechnical investigations were carried out using the field test method known as the Standard Penetration Test (SPT), to determine the stratigraphy of the terrain, and the retroanalysis technique was used to determine the geotechnical parameters that characterized the slope. This made it possible to model the case study massif both topographically and geotechnically in order to design the appropriate stabilization methods for the slope under study. After sizing the different methods, budgets were made to verify the best cost-benefit of the engineering techniques used in this work.

KEYWORDS: Landslides, Geotechnics, Retroanalysis, Slope stabilization.

1 INTRODUÇÃO

Os escorregamentos de massas de solos são eventos naturais que ocorrem em várias partes do mundo, causando grandes prejuízos financeiros, sociais e perdas de vidas humanas. Esses deslizamentos são influenciados por diversos fatores, dentre eles as condições geotécnicas do solo e as condições ambientais, como, por exemplo, a pluviosidade acentuada. Por isso, a análise da estabilidade de taludes é um tema crucial

para a engenharia geotécnica, uma vez que essas estruturas podem se tornar instáveis e causar significativos prejuízos financeiros, sociais e perdas de vidas humanas

Os movimentos de massa são um dos fenômenos naturais mais devastadores em todo o mundo. Eles ocorrem quando grandes volumes de solo ou rocha se deslocam devido a fatores naturais, como chuvas intensas, ou ações antrópicas, como desmatamento e construções inadequadas em encostas. De acordo com a Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (Geo-Rio, 2020), esses fenômenos são responsáveis por muitos danos financeiros e óbitos no mundo. A Pesquisa de Informações Básicas Municipais (MUNIC), conduzida pelo IBGE em 2002 e publicada em 2005, revelou que cerca de 50% dos municípios brasileiros já sofreram algum desastre, com 16% destes eventos envolvendo movimentos de massa.

Para prevenir tais acidentes, estudos e análises geotécnicas são essenciais, bem como a avaliação de soluções de engenharia geotécnica para contenção de maciços terrosos. Existem diversas soluções, que podem ser classificadas em provisórias e definitivas. Entre as soluções provisórias, destacam-se os Perfis Metálicos e as Estacas de Madeira, que são removidos quando cessada sua necessidade. Já as soluções definitivas incluem uma variedade de técnicas de engenharia, como Muros de Gravidade, Muros de Flexão, Cortina Atirantada, Retângulo, Parede Diafragma, Sistema Modular de Contenção, Solos Reforçados com Geossintéticos ou elementos metálicos, Solo Grampeado, entre outras. A escolha da solução mais apropriada depende das características do solo ou rocha, da geometria do talude e de outros fatores específicos de cada caso.

Sendo assim, o presente estudo teve como objetivo identificar as características geológico-geotécnicas do talude que sofreu uma ruptura em 5 de março de 2020, resultando na interdição da rodovia onde está localizado.

Além disso, neste trabalho, foram abordadas técnicas eficientes de estabilização de tais estruturas em solos para o presente estudo de caso, utilizando o *software* Slide2®, versão 9.029, desenvolvido pela Rocscience®.

2 LOCALIZAÇÃO

O talude deste estudo de caso está localizado na Rodovia José Francisco da Silva, S/N, no bairro Parque Aurilândia, em Nova Lima – MG, com as seguintes coordenadas UTM:

- Longitude: 618248 m E;
- Latitude: 7788947 m S;
- DATUM: SIRGAS2000;
- Zona: 23K.

A Figura 1 apresenta uma imagem aérea do talude, evidenciando a proximidade com as residências da região. A Figura 2 mostra o maciço terroso logo após a ruptura e os impactos causados na rodovia.



Figura 1. Imagem aérea do talude do estudo de caso. (Modificado de GOOGLE EARTH, 2023).



Figura 2. Imagem do rompimento do talude do estudo de caso. (CAETANO, 2020).

3 CARACTERIZAÇÃO DO TALUDE

3.1 Topografia

Através da empresa responsável pela elaboração do projeto de contenção, foi possível obter o levantamento topográfico abrangendo todo o entorno da área em estudo. Com esses dados, tornou-se possível modelar a geometria do talude pré-ruptura.

O levantamento topográfico revelou que o talude possui uma área de 2.512 metros quadrados, que foi dividida em três seções: Seção AA', Seção BB' e Seção CC'. As dimensões de cada seção estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Resumo das dimensões geométricas de cada seção do talude em estudo. (Autores, 2024).

Seção	Altura (m)	Comprimento Longitudinal (m)	Comprimento Transversal (m)
AA'	32	20,50	85,20
BB'	28	20,75	79,40
CC'	26	17,50	71,60

3.2 Investigação geológico-geotécnica

O método empregado para adquirir informações sobre a estratificação do terreno foi o *Standard Penetration Test* (SPT), amplamente utilizado devido à sua facilidade de execução, acessibilidade a locais de difícil alcance e ao grande número de correlações empíricas estabelecidas por pesquisadores na engenharia geotécnica. No talude estudado, foram realizados nove furos de sondagem antes da ruptura, distribuídos entre as três seções, com o objetivo de obter um perfil estratigráfico representativo e verificar a presença ou ausência do nível d'água. Os dados das sondagens a percussão são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Dados da campanha de investigação geológico-geotécnica. (Autores, 2024).

Identificação	Profundidade (m)	Nível d'Água (m)	Critério de Paralisação	Profundidade Total (m)
SP-01	10,08	6,88		
SP-02	8,06	7,64		
SP-03	3,08	2,77		
SP-04	7,05	2,88		
SP-05	7,09	4,27	Impenetrável ao Trépano de Lavagem	53,58
SP-06	3,08	1,07		
SP-07	7,09	3,52		
SP-08	4,03	0,72		
SP-09	4,02	1,95		

Todas as sondagens foram realizadas conforme os procedimentos da ABNT NBR 6484:2020. Com base nos resultados dos ensaios, foi possível aplicar a norma para classificar os solos quanto à compacidade, no caso de solos arenosos, e à consistência, para solos argilosos.

Os laudos de sondagem apontaram uma camada superior de Colúvio, com pequena espessura, predominantemente argilo-siltoso, de cor marrom pálido, contendo fragmentos vegetais e pedregulhos finos de quartzo. Este material apresentou um NSPT médio de 2, indicando uma consistência muito mole.

Após a camada de Colúvio, identificou-se uma camada de Solo Residual de Xisto, com textura predominantemente silto argilo-arenosa e coloração marrom-amarelada, com áreas cinza-escuro. Essa camada apresentou estruturação em porções menos alteradas do afloramento, com um NSPT médio de 7, correspondente a uma consistência média.

Seguindo a camada de Solo Residual de Xisto, encontrou-se uma camada de Saprolito de Xisto com textura silto-arenosa, de cor marrom-amarelada, intercalada com áreas cinza-escuro. Essa camada apresentou-se estruturada devido à presença predominante de quartzo e sericita, com um NSPT médio de 31, aproximando-se do limite do impenetrável à percussão, sendo classificada como compacta.

Após a camada de Saprolito de Xisto, foram estimadas duas camadas de rocha Sericita Quartzo Xisto, sendo a camada superior como uma rocha altamente intemperizada, de resistência muito branda e extremamente fraturada, e a camada inferior como uma rocha levemente intemperizada, resistente e medianamente fraturada. Essas estimativas foram possíveis devido à presença de parte da estrutura da rocha no Saprolito.

Em todos os furos de sondagem a percussão, encontrou-se o nível d'água, que foi utilizado para as análises de estabilidade das seções do talude.

Neste trabalho, é apresentada apenas a seção AA', que apresentou o menor fator de segurança nas retroanálises, entre as outras duas seções, Seção BB' e Seção CC', a qual o fator de segurança ficou exatamente igual a 1,00. Isso indica que essa seção seria a primeira a romper. A análise de estabilidade, que mostra o fator de segurança da seção crítica, é apresentada na Figura 5 do item 3.3.

O perfil geológico-geotécnico da seção AA' está apresentado na Figura 3, e a legenda geológico-geotécnica é mostrada na Figura 4

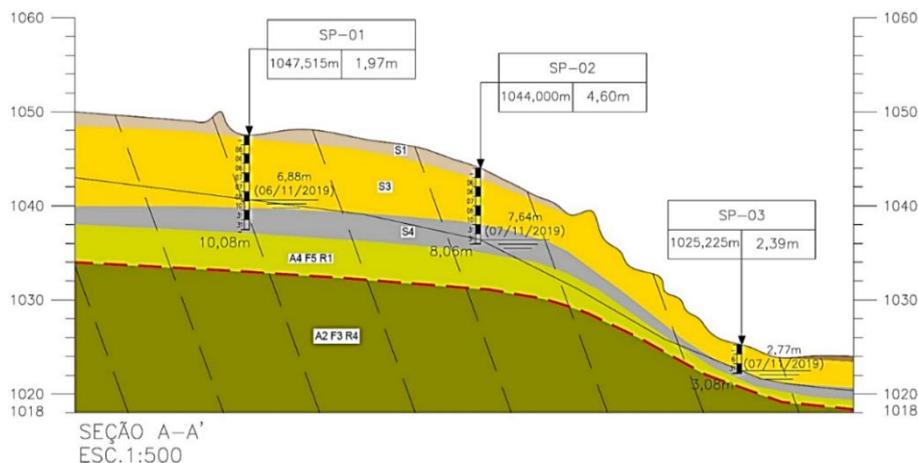


Figura 3. Perfil geológico-geotécnico - Seção AA'. (Autores, 2024).

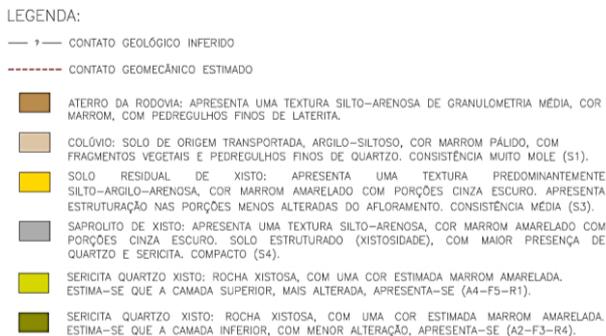


Figura 4. Legenda geológica-geotécnica. (Autores, 2024).

3.3 Retroanálise e parâmetros geotécnicos do talude em estudo

A determinação dos parâmetros geotécnicos das camadas de um talude rompido pode ser realizada por meio de retroanálises, conforme a norma ABNT NBR 11682:2009, desde que sejam conhecidas as características geotécnicas e geométricas do maciço terroso antes da ruptura, o que se aplica ao presente estudo de caso.

Como bem nos assegura Bretas (2020), para a realização da retroanálise, é necessário modelar o talude com base na sua geometria real de campo antes da ruptura e variar os parâmetros geotécnicos até que o fator de segurança atinja o valor igual a 1,00. É importante que as etapas da retroanálise sejam feitas com parâmetros geotécnicos adequadamente definidos, para garantir uma análise precisa.

Ao utilizar a retroanálise para a análise de estabilidade, com base no conhecimento da geometria da superfície de ruptura ocorrida e outros fatores presentes no momento da ruptura, como sobrecargas, posição do nível de água e outros, foi possível determinar o peso específico natural e saturado do solo, assim como os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais do talude, permitindo assim a obtenção dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito.

Para o talude deste estudo de caso, modelado de acordo com os dados topográficos e investigações realizadas, foi possível obter os parâmetros geotécnicos por meio das retroanálises realizadas no *software* Slide2 da Rocscience® na versão 9.029. Essas análises foram conduzidas utilizando cálculos determinísticos por equilíbrio-limite para uma superfície de ruptura não circular, através do modo de busca “*Auto Refine Search*” devido à não homogeneidade do maciço, e três métodos rigorosos de cálculo: Spencer, GLE/Morgenstern-Price e Sarma. Na Figura 5, é apresentada a retroanálise da seção AA’ do talude. Na Figura 6, é mostrada a comparação entre a cunha de ruptura real (verde) e a cunha de ruptura calculada pelo *software* (vermelho). A análise revela que a geometria da superfície de ruptura calculada é semelhante à que ocorreu de fato, o que confirma a precisão do modelo utilizado. Além disso, a imagem também apresenta a massa de solo deslocada após a ruptura.

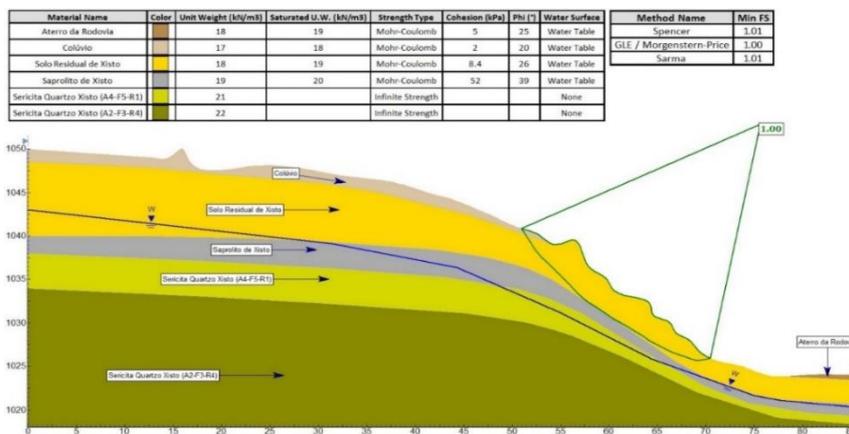


Figura 5. Retroanálise da Seção AA’ - FS = 1,00. (Autores, 2024).

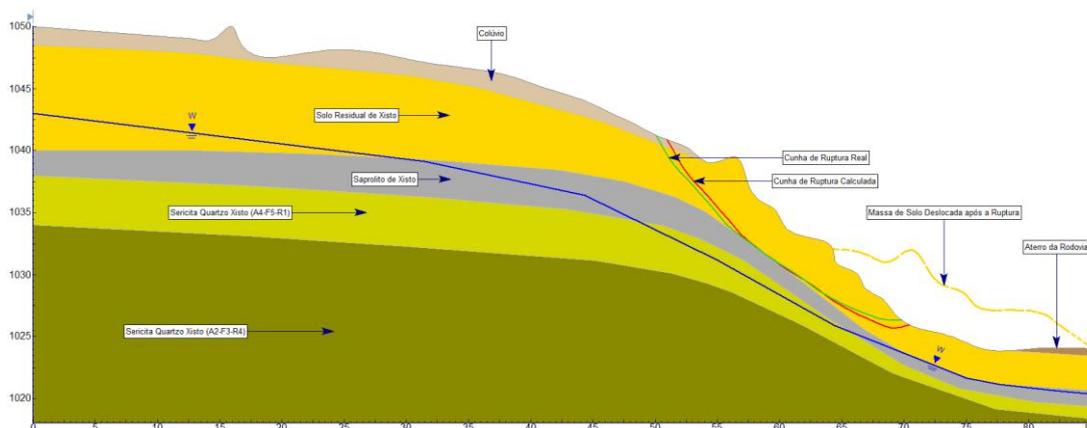


Figura 6. Comparativo entre a cunha real (verde) e a calculada pelo *software* (vermelho). (Autores, 2024).

Com a retroanálise realizada, foi possível definir os parâmetros geotécnicos dos materiais presentes no talude, apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros geotécnicos obtidos através da retroanálise. (Autores, 2024).

Material	Cor	γ natural (kN/m ³)	γ saturado (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Aterro da Rodovia		18	19	5	25
Colúvio		17	18	2	20
Solo Residual de Xisto		18	19	8,4	26
Saprolito de Xisto		19	20	52	39
Sericita Quartzo Xisto (A4-F5-R1)		21	-	Infinite Strength	
Sericita Quartzo Xisto (A2-F3-R4)		22	-	Infinite Strength	

4 DIMENSIONAMENTO DE TÉCNICAS PARA ESTABILIZAÇÃO DO TALUDE EM ESTUDO

As contenções dimensionadas neste trabalho foram: retaludamento, muro de gabião, solo grampeado e cortina atirantada. Para todas as soluções propostas, foram realizadas análises considerando uma sobrecarga acidental de 20 kPa na superfície do terreno, conforme recomendado pela ABNT NBR 11682:2009 para o desenvolvimento de projetos de contenção e estabilização de taludes.

A seguir, da Tabela 4 à Tabela 7, estão retratadas as principais informações geométricas e de resistência para as contenções dimensionadas.

Tabela 4. Retaludamento - Dados geométricos da Seção AA'. (Autores, 2024).

Identificação	Altura dos Taludes (m)	Largura das Bermas (m)	Inclinação dos Taludes (°)
Primeira Banqueta	9,0	5	34
Segunda Banqueta	9,5	5	34

Tabela 5. Muro de Gabião - Dados geométricos da Seção AA'. (Autores, 2024).

Altura Total do Gabião (m)	Altura de Cada Gabião (m)	Largura Total da Base do Gabião (m)	Largura da Base de Cada Gabião (m)	Inclinação (°)
6	1	4	0,5	5

Tabela 6. Solo Grampeado - Dados geométricos e de resistência da Seção AA'. (Autores, 2024).

Quantidade de Linhas Verticais de Grampos	Comprimento dos Grampos (m)	Inclinação dos Grampos (°)	Espaçamento Horizontal (m)	Espaçamento Vertical (m)	Carga de Trabalho dos Grampos (kN)	Resistência ao Cisalhamento no Contato Solo-Grampo (q_s) (kN/m ²)
13	Variável (3,5 a 6,0)	15	1,5	1,5	190	Variável (65,0 a 282,5)

Tabela 7. Cortina Atirantada - Dados geométricos e de resistência da Seção AA'. (Autores, 2024).

Quantidade de Linhas Verticais de Tirantes	Comprimento dos Tirantes (m)	Inclinação dos Tirantes (°)	Espaçamento Horizontal (m)	Espaçamento Vertical (m)	Carga de Trabalho dos Tirantes (kN)	Resistência ao Cisalhamento no Contato Solo-Tirante (q_s) (kN/m ²)
7	Variável (9,0 a 14,0)	15	1,5	Variável (1,65 a 2,50)	320	Variável (65,0 a 282,5)

5 RESULTADOS DAS ANÁLISES DE ESTABILIDADE

As contenções foram dimensionadas para atender ao fator de segurança mínimo, conforme estabelecido na ABNT NBR 11682:2009, adotando um valor de 1,50. Essa escolha foi fundamentada na consideração de que, em caso de ruptura, os danos materiais e ambientais seriam altos. O escorregamento do talude poderia interromper o acesso à rodovia e afetar serviços essenciais. Além disso, os riscos para vidas humanas também foram considerados altos, principalmente devido ao intenso tráfego de veículos na rodovia. Na Tabela 8 são apresentados os resultados das análises de estabilidade das contenções propostas como possíveis soluções técnicas para o talude em estudo.

Tabela 8. Resultados das análises de estabilidades das contenções. (Autores, 2024).

Tipo de Contenção	Fator de Segurança Mínimo Calculado	Fator de Segurança Mínimo ABNT NBR 11682:2009
Retaludamento	1,52	1,50
Muro de Gabião	1,11	1,50
Solo Grampeado	1,51	1,50
Cortina Atirantada	1,53	1,50

Conforme demonstrado na Tabela 8, as contenções apresentaram fatores de segurança satisfatórios, em conformidade com a ABNT NBR 11682:2009 ($FS \geq 1,50$), exceto a contenção em muro de gabião, que se revelou ineficaz para o presente estudo, ficando aquém dos valores mínimos de segurança estabelecidos pela referida norma.

6 ORÇAMENTOS DAS TÉCNICAS PROPOSTAS COMO SOLUÇÃO

Com base nos dados geométricos e nas análises de estabilidade realizadas, foi possível estimar o valor das contenções dimensionadas, conforme apresentado na Tabela 9. Adicionalmente, além dos preços em reais (R\$), também foram calculados os preços em dólar americano (US\$). Para esse cálculo, considerou-se a cotação do dólar americano no dia 11 de outubro de 2023, de acordo com o site "UOL Economia", que indicava um dólar americano (US\$) equivalente a R\$5,05. Os valores utilizados foram obtidos de tabelas públicas com desoneração, provenientes de bases de dados como SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil), SUDECAP (Superintendência de Desenvolvimento da Capital) e SEINFRA (Secretaria de Estado de Infraestrutura, Mobilidade e Parcerias).

Tabela 9. Orçamento das contenções dimensionadas. (Autores, 2024).

Tipo de Contenção	Preço em Reais (R\$)	Preço em Dólar Americano (US\$)
Retaludamento	198.133,84	39.234,42
Muro de Gabião	269.139,26	53.294,90
Solo Grampeado	568.740,81	112.621,94
Cortina Atirantada	1.322.201,07	261.821,99

7 CONCLUSÃO

O estudo de caso consistiu na realização de uma retroanálise de um talude localizado no município de Nova Lima, em Minas Gerais, que sofreu uma ruptura no dia 5 de março de 2020.

Para a condução do estudo, o maciço terroso foi caracterizado com base na topografia e nas investigações geológico-geotécnicas executadas em campo, resultando na definição de três seções distintas: Seção AA', Seção BB' e Seção CC'. A partir desses dados, foi possível modelar o talude e definir os parâmetros geotécnicos por meio de retroanálises.

Após a caracterização desse maciço, procedeu-se ao dimensionamento dos métodos de estabilização para o talude, em conformidade com as normas ABNT NBR vigentes no ano de 2023, período de análise do estudo de caso. Destaca-se a ênfase dada à ABNT NBR 11682:2009, que estabeleceu os fatores de segurança mínimos para as análises de estabilidade realizadas. Esse processo englobou o dimensionamento geotécnico

tanto para o retaludamento quanto para o muro de gabião, bem como o dimensionamento estrutural dos grampos do solo grampeado e dos tirantes da cortina atirantada.

As análises de estabilidade das soluções propostas foram conduzidas com o auxílio do *software* Slide2 da Rocscience®, versão 9.029. Os resultados indicaram que, do ponto de vista geotécnico, todas as contenções tornariam o talude estável ($FS > 1,00$). No entanto, do ponto de vista normativo, o muro de gabião não atingiu o fator de segurança mínimo conforme a ABNT NBR 11682:2009 ($FS \geq 1,50$). Portanto, para o presente estudo de caso, o retaludamento, o solo grampeado e a cortina atirantada foram aprovados tanto do ponto de vista geotécnico quanto do ponto de vista normativo.

Além do dimensionamento, foram realizados orçamentos para cada tipo de solução ao longo dos 58,75 metros de extensão do talude. O retaludamento foi a opção mais viável em termos de custo-benefício, com um valor total de R\$198.133,84, equivalente a US\$39.234,42, resultando em um valor de R\$3.372,49, ou US\$667,82 por metro linear. Em seguida, o solo grampeado teve um custo total de R\$568.740,81, correspondente a US\$112.621,94, resultando em um valor de R\$9.680,69, ou US\$1.916,97 por metro linear. A cortina atirantada, embora eficaz, apresentou um custo mais elevado, com um valor total de R\$1.322.201,07, equivalente a US\$261.821,99, resultando em um valor de R\$22.505,55, ou US\$4.456,54 por metro linear. Ressalta-se que, mesmo o muro de gabião não atendendo ao fator de segurança mínimo preconizado pela ABNT NBR 11682:2009, foi realizado um orçamento para esse método, totalizando R\$269.139,26, equivalente a US\$53.294,90, resultando em um valor de R\$4.581,09, ou US\$907,15 por metro linear. É importante destacar que todos os tipos de soluções incluíram elementos de drenagem, tais como descidas d'água, canaletas, drenos horizontais profundos e drenos do tipo barbacã. Além disso, tanto o retaludamento quanto o muro de gabião, juntamente com as medidas de drenagem, contemplaram a proteção vegetal em seu orçamento.

No entanto, ressalta-se que, além do custo-benefício, a viabilidade executiva deve ser levada em consideração na escolha da técnica de estabilização a ser empregada. Nem sempre a contenção mais economicamente vantajosa pode ser executada devido a restrições do local.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Josias Eduardo Rossi Ladeira pela orientação exemplar e dedicada ao longo de todo o processo de desenvolvimento deste trabalho, à empresa responsável pela elaboração do projeto de contenção do talude, pelo fornecimento dos dados necessários a este trabalho, e à PUC Minas, pela licença do *software*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.
- Bretas, T. C. (2020) *Retroanálise probabilística tridimensional por equilíbrio-limite de rupturas de talude em Belo Horizonte/MG*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica, Núcleo de Geotecnia, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, 175 p.
- GEO-RIO, Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (2020). *Manual Técnico de Encostas*. Rio de Janeiro.
- SEINFRA. (2023) Planilha - Preço, Belo Horizonte. Secretaria de Estado de Infraestrutura e Mobilidade de Minas Gerais.
- SINAPI. (2023) Referências para Custos Horários e Encargos: Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil, Brasília. CAIXA. 5ª ed.
- SUDECAP. (2023) Tabela - Preço Desonerada, Belo Horizonte. Superintendência de Desenvolvimento da Capital.
- UOL Economia. (2023) *Cotação do Dólar*. Disponível em: <<https://economia.uol.com.br/cotacoes/cambio/>>. Acesso em: 16 out. 2023.