

FACULDADE DE ENGENHARIA DE MINAS GERAIS - FEAMIG

PAULA SANT'ANNA MOREIRA PAIS

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE CORTE EM ÁREAS DE
MINERAÇÃO: ESTUDO DE CASO**

Belo Horizonte - MG

2024

PAULA SANT'ANNA MOREIRA PAIS

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE CORTE EM ÁREAS DE
MINERAÇÃO: ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia
de Minas Gerais como parte das
exigências do curso de Engenharia Civil,
para a obtenção do título de Engenheira
Civil.

Orientador

MSc. Diego de Jesus Queiroz Rosa

Belo Horizonte - MG

2024

RESUMO

Este estudo teve como objetivo avaliar a estabilidade de sete taludes localizados em uma área de acesso dentro de uma mineradora e, propondo medidas de estabilização, quando necessário. Utilizando o software Slide 2 e os parâmetros geotécnicos das sondagens, as análises determinaram os fatores de segurança dos taludes. Medidas de proteção, como rip-rap, muros de gabião e solo grampeado, foram recomendadas para garantir a estabilidade e prevenir deslizamentos.

Palavras-chave: Movimentos de massa. Estabilidade de taludes. Estruturas de contenção

ABSTRACT

This study aimed to assess the stability of seven slopes located in an access area within a mining site and propose stabilization measures when necessary. Using the Slide 2 software and the geotechnical parameters from the boreholes, the analyses determined the safety factors of the slopes. Protective measures such as rip-rap, gabion walls, and soil nailing were recommended to ensure stability and prevent landslides.

Keywords: Mass movements. Slope stability. Retaining structures.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
1.1	Objetivo.....	7
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1	Conceito de Taludes.....	7
2.2	Movimentos de Massa.....	8
2.2.1	Tipos de Movimentos de Massa.....	8
2.3	Principais Causas de Ruptura de Taludes.....	11
2.3.1	Infiltração da Água.....	12
2.3.2	Erosão.....	12
2.3.3	Sobrecarga.....	12
2.3.4	Geologia e Estrutura do Solo.....	12
2.3.5	Ação Humana.....	12
2.4	Análise da Estabilidade de Taludes.....	12
2.5	Estabilização de Taludes.....	16
3	METODOLOGIA	17
3.1	Localização da Região em Estudo.....	17
3.2	Levantamento Topográfico.....	20
3.3	Parâmetros Geotécnicos Adotados.....	21
3.4	Estudos Realizados.....	21
4	RESULTADOS	26
4.1	Análise da Estabilidade para a Condição Atual.....	26
4.2	Dimensionamento dos Grampos.....	29
4.3	Concepção do Projeto.....	30
4.3.1	Proteção em Rip-Rap.....	31
4.3.2	Muro de Contenção em Gabião.....	32
4.3.3	Retaludamento.....	33
4.3.4	Solo Grampeado.....	34
4.3.5	Proteção Superficial.....	35
4.4	Análise de Estabilidade de Projeto.....	36
4.5	Análise de Segurança do Gabião Existente	39
5	CONCLUSÃO	40
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

1. INTRODUÇÃO

Os taludes são superfícies inclinadas que delimitam um maciço de solo ou rocha (GERSCOVICH, 2016). Sua estabilidade é uma preocupação constante em obras civis e geotécnicas, especialmente em regiões com desafios geológicos significativos. A ruptura de taludes não apenas representa um problema estrutural, mas também ameaça à segurança de áreas circundantes. Portanto, estudos de caso que investigam a estabilização de taludes rompidos desempenham um papel fundamental na compreensão das causas, nas técnicas de intervenção e na avaliação da eficácia das medidas adotadas.

Conforme Reis (2010) a implementação de taludes é comum em projetos de engenharia e na indústria de mineração, sendo crucial para garantir a estabilidade do terreno. Essas estruturas consistem em planos inclinados que delimitam aterros de terra, podendo resultar de escavações ou formações naturais. Em ambientes de extração mineral, os taludes são usados em cavas, pilhas de estéril, minerodutos, estruturas industriais, contenção de rejeitos e até em vias ou acessos rodoviários. A construção dessas estruturas apresenta desafios significativos, especialmente devido à sua profundidade e limites extremos, destacando a importância de métodos de escavação seguros e econômicos para evitar instabilidades que podem causar acidentes e comprometer as operações.

Ainda segundo o autor supracitado, as análises de estabilidade em taludes devem incluir uma descrição geotécnica detalhada das rochas e solos, embasada tecnicamente, e um entendimento claro dos mecanismos de ruptura que têm potencial para causar acidentes.

Quando o talude não se apresenta estável, devem ser realizadas intervenções para este fim. Dentro dessas intervenções está a utilização de estruturas de contenção que são fundamentais para garantir a estabilidade do terreno e prevenir deslizamentos e colapsos. Conforme destacado por Gerscovich (2016), essas estruturas são projetadas para conter o solo ou rocha e limitar a movimentação de materiais, contribuindo para a segurança das operações mineradoras e a proteção do meio ambiente. Além disso, Brady e Brown (2006) ressaltam a importância das estruturas de contenção na prevenção de danos às estruturas circundantes e na garantia da segurança dos trabalhadores.

Neste trabalho, o estudo foi realizado em taludes de acesso em uma área de mineração, utilizados para o tráfego de trabalhadores e máquinas na planta de extração de minério e para o escoamento do minério. A estabilidade desses taludes é crucial para evitar acidentes com as pessoas que utilizam esses acessos e para garantir o fluxo contínuo

do minério, destacando a importância da estabilização dessas estruturas para a segurança e a eficiência das operações mineradoras.

1.1 Objetivo

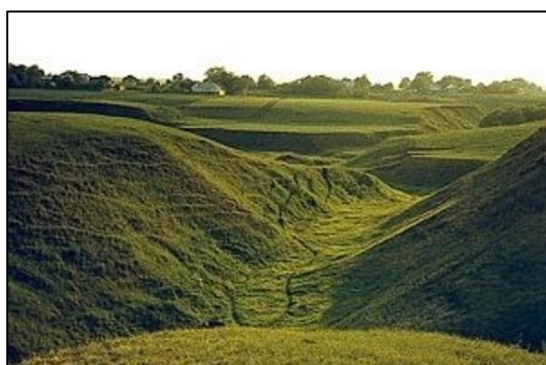
Avaliar a estabilidade de sete taludes localizados em uma área de acesso dentro de uma mineradora e, propondo medidas de estabilização, quando necessário.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Taludes

Os taludes são elementos fundamentais na engenharia geotécnica, sendo definidos como superfícies inclinadas que delimitam um maciço de solo ou rocha (GERSCOVICH, 2016). Eles desempenham um papel crucial na estabilidade de estruturas, como estradas, barragens e edifícios influenciando diretamente a segurança e a eficiência de uma obra. Neste contexto, a compreensão dos conceitos relacionados aos taludes é essencial para o desenvolvimento de projetos geotécnicos seguros e eficazes.

Os taludes são classificados de acordo com sua inclinação e função. Segundo Gerscovich (2016), eles podem ser classificados como taludes naturais, também denominado encosta (Figura 1a), formados pela erosão de agentes naturais, ou taludes artificiais (Figura 1b), criados pela intervenção humana em cortes e aterros. Além disso, a inclinação dos taludes pode variar de acordo com o tipo de solo e as condições geológicas, sendo classificados como taludes íngremes, com inclinação maior que 45°, taludes moderados, com inclinação entre 15° e 45°, e taludes suaves, com inclinação menor que 15° (DAS, 2007).



(a)



(b)

Figura 1. Tipos de taludes. (a) Talude natural (encosta); (b) Talude artificial de corte.
Fonte: bibocaambiental.blogspot.com.br.

Um dos aspectos cruciais na engenharia geotécnica é a estabilidade dos taludes. Segundo Duncan et al. (2014), a estabilidade de um talude é influenciada por uma série de fatores, incluindo a geometria do talude, as propriedades do solo, as condições hidrogeológicas e as cargas aplicadas. O estudo da estabilidade de taludes envolve a análise de forças e momentos atuantes no talude, bem como a avaliação da resistência do solo à ruptura (LIMA, et al., 2018).

2.2 Movimentos de Massa

O movimento de massas é um fenômeno natural e geológico que envolve o deslocamento de materiais, como solo, rochas e detritos, ao longo de encostas e taludes.

Conforme Gerscovich (2016), os movimentos de massa são tratados como processos associados a problemas de instabilidade de encostas.

2.2.1 Tipos de Movimentos de Massa

Os movimentos de massa podem ser classificados em quatro grandes subtipos: rastejos (*creep*), escorregamentos *stricto sensu* (*slides*), quedas (*falls*) e corridas (*flows*) (AUGUSTO FILHO, 1992).

O rastejo (*creep*) (Figura 2) é caracterizado por ser um movimento lento e contínuo, com deslocamento de poucos centímetros por ano (cm/ano). Sua geometria é indefinida, com a massa em movimento e a massa inerte não sendo diferenciadas (GUIDICINI; NIEBLE, 1984; AUGUSTO FILHO, 1992; MACIEL FILHO, 1997). De acordo com Guidicini e Nieble (1984), o rastejo está relacionado à ação da gravidade e às variações térmicas, que causam expansão e contração do material, resultando em seu deslocamento.

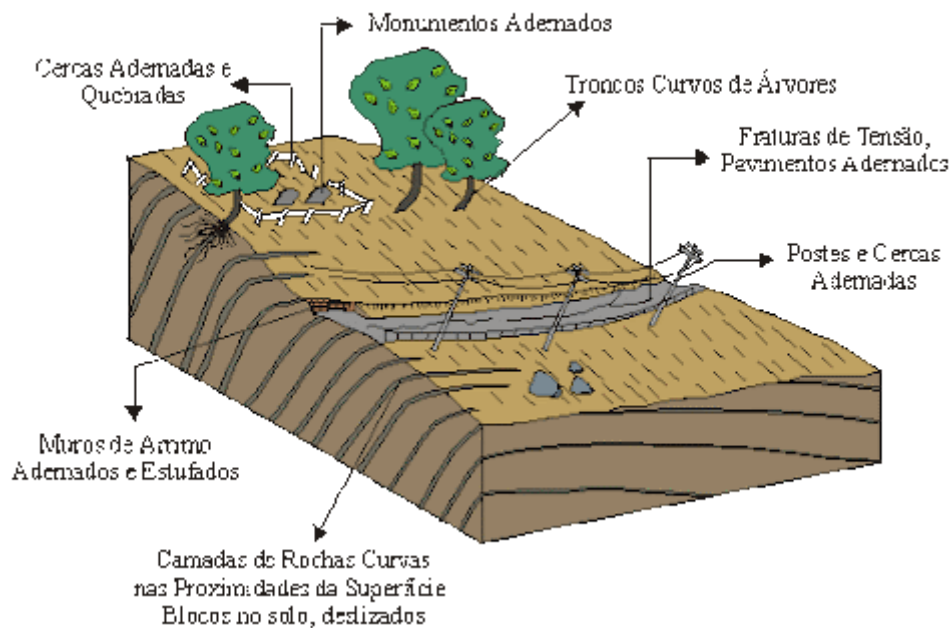


Figura 2. Rastejo.
Fonte: Igeológico.

Os escorregamentos (*slides*) são caracterizados por deslocamentos acelerados, com duração moderadamente curta, de massas geralmente bem definidas em relação ao seu volume, onde o centro de gravidade se desprende para baixo e para fora da encosta (AUGUSTO FILHO, 1992). A velocidade de um escorregamento aumenta de zero para cerca de 0,30 m por hora e então diminui até se estabilizar (TERZAGHI, 1967). Eles podem atingir velocidades mais altas (alguns metros por segundo), sendo influenciados pela inclinação da superfície do escorregamento, pela razão inicial do deslocamento e pela forma da encosta (LISTO et al., 2022).

De acordo com Augusto Filho (1992), os escorregamentos são classificados com base na forma do plano de ruptura (rotacional ou translacional) e no tipo de material em movimento.

Os escorregamentos rotacionais (*slumps*) (Figura 3a) ocorrem em uma superfície de ruptura curva, onde o material se move de forma côncava para cima. Eles estão associados a áreas com solos profundos, que facilitam a infiltração e percolação excessiva de água. Já os escorregamentos translacionais (*shallow*) (Figura 3b), comuns no Brasil, apresentam superfícies planas e são influenciados por estruturas geológicas, como fraturas, e pelos contatos entre diferentes materiais, como solo e rocha, e entre horizontes do solo e depósitos coluvionares de encostas (LISTO et al., 2022).

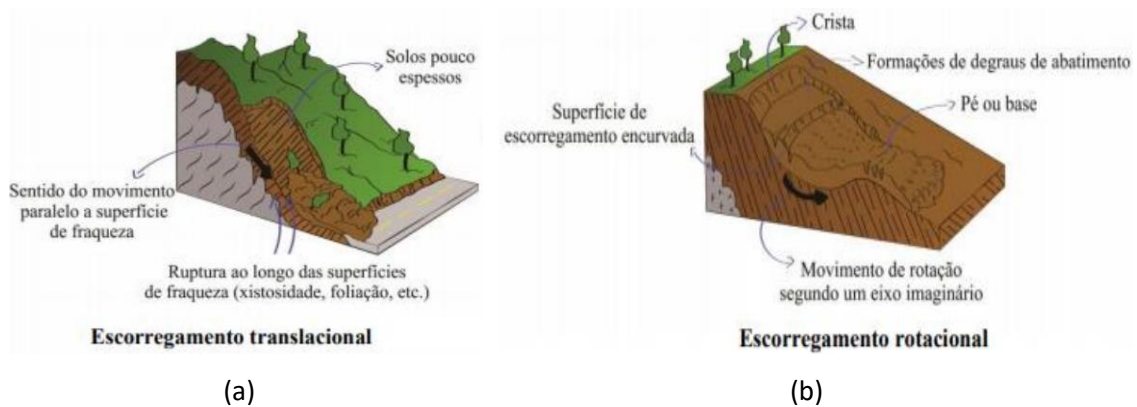


Figura 3. Escorregamentos. (a) Escorregamento translacional; (b) Escorregamento rotacional. Fonte: Brito (2014).

Carvalho et al. (2007) descrevem um terceiro tipo de escorregamento, conhecido como escorregamento em cunha (Figura 4), que ocorre em saprólitos e maciços rochosos. Esse tipo de escorregamento é caracterizado pela presença de dois planos de fraqueza que causam o deslocamento ao longo do eixo de interseção desses planos. Segundo Listo et al. (2022) esses processos são mais comuns em taludes artificiais (cortes/aterros) ou em encostas que foram expostas a um processo de desconfinamento natural, como erosões ou escorregamentos anteriores.



Figura 4. Escorregamento em cunha. Fonte: Brito (2014).

As quedas de blocos (Figura 5) são movimentos gravitacionais de blocos rochosos que ocorrem devido à presença de descontinuidades, como bandeamentos, e à dilatação e contração causadas pela variação de temperatura. Essas descontinuidades criam caminhos preferenciais para a água, contribuindo para a ruptura da encosta (AUGUSTO FILHO, 1992). De acordo com Maciel Filho (1997), as quedas de blocos são

caracterizadas por uma queda livre dos blocos de uma elevação, sem a necessidade de uma superfície de deslizamento definida.

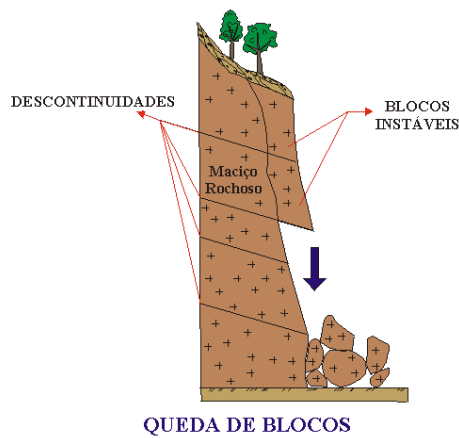


Figura 5. Quedas de blocos.
Fonte: Igeológico.

As corridas de massa, conhecidas como *earth-flow* ou *mud-flow*, ocorrem quando o solo e/ou regolito que estão sujeitos ao rastejo ficam saturados de água, permitindo que a massa encharcada se mova encosta abaixo a uma taxa de alguns centímetros ou decímetros por hora ou por dia. Esse tipo de movimento, denominado solifluxão, é caracterizado pela presença de uma superfície impermeável dentro do solo ou no embasamento rochoso, que causa a saturação em água do solo e/ou regolito, levando à movimentação dos detritos que cobrem toda a superfície da encosta (GERSCOVICH, 2016).

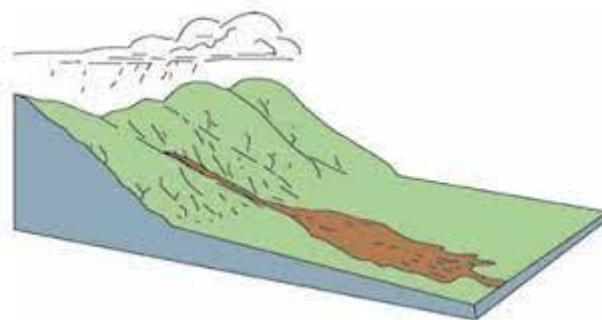


Figura 6. Corrida de massa.
Fonte: Riffel et al. (2016).

2.3. Principais causas de ruptura de taludes

Os taludes estão sujeitos a diversos fatores que podem levar à sua ruptura, sendo importante compreender essas causas para a realização de projetos geotécnicos seguros. Algumas das principais causas de ruptura são tratadas a seguir.

2.3.1. Infiltração de Água

A infiltração de água nos taludes é uma das principais causas de instabilidade. Segundo Fredlund et al. (2012), a água pode reduzir a coesão do solo, aumentar o peso efetivo e diminuir a resistência ao cisalhamento, levando à ruptura do talude.

2.3.2. Erosão

A erosão causada pela ação da água, do vento ou de processos geológicos pode remover o material de suporte do talude, comprometendo sua estabilidade. Conforme Vargas (2013), a erosão pode criar superfícies inclinadas propensas a deslizamentos.

2.3.3. Sobrecarga

A aplicação de cargas adicionais no topo do talude, como edifícios, estradas ou aterros, pode aumentar as tensões no solo e causar a ruptura. Duncan et al. (2014) afirmam que a sobrecarga é uma das principais causas de falhas de taludes.

2.3.4. Geologia e Estrutura do Solo

A geologia e a estrutura do solo influenciam diretamente na estabilidade do talude. Solos com baixa coesão, presença de camadas de solo fraco ou rochas com fraturas podem ser mais propensos a rupturas (DAS, 2007).

2.3.5. Ação Humana

Atividades humanas, como escavações inadequadas, remoção de vegetação, construção de estruturas inadequadas e alterações no uso do solo, podem desencadear a ruptura de taludes (VARGAS, 2013).

2.4. Análise da estabilidade de taludes

A análise de estabilidade de taludes é frequentemente realizada por meio de métodos determinísticos, especialmente os baseados na Teoria do Equilíbrio Limite. Essa teoria considera o solo como um corpo rígido-plástico à beira do escorregamento, com uma superfície de ruptura hipotética predefinida. Nesse cenário, existem duas forças atuando no corpo: a força solicitante, que tenta movê-lo, e as forças resistentes, que impedem esse movimento (MASSAD, 2010).

Essas análises são feitas em duas dimensões, sem considerar o confinamento lateral, e assumem um Fator de Segurança (FS) constante em todos os pontos do perfil, não considerando a possibilidade de ruptura progressiva (MASSAD, 2010).

O autor supracitado ainda menciona que a aplicação da Teoria do Equilíbrio Limite pode ser feita considerando o solo como um todo (Método Geral ou do Círculo de Atrito), dividido em fatias (Método das Fatias ou Sueco) ou em cunhas (Método das Cunhas). O Método das Fatias é amplamente utilizado em estudos de instabilidade devido à sua capacidade de lidar com solos heterogêneos, superfícies irregulares de taludes e inclusão da poropressão no maciço de solo (GALO, 2017). Esse método consiste em dividir a superfície de ruptura em fatias e aplicar as condições de equilíbrio estático a cada uma delas.

$$\Sigma F_h = 0 \quad (1)$$

$$\Sigma F_v = 0 \quad (2)$$

$$\Sigma M_0 = 0 \quad (3)$$

A partir do Método das Fatias, foram desenvolvidos diversos outros métodos que diferem principalmente na escolha das equações de estática consideradas e satisfeitas, na inclusão ou não dos esforços normais e cisalhantes entre as fatias, e na distribuição das forças de interação (KRAHN, 2003). Alguns dos métodos mais conhecidos incluem os métodos de Bishop (simplificado), Jambu (simplificado) e Morgenstern-Price.

O método de Bishop simplificado é um dos métodos clássicos para análise de estabilidade de taludes. A figura 7 apresenta um esquema de como o método de Bishop considera as forças aplicadas a uma fatia de solo. Neste método, o cálculo do Fator de Segurança (FS) é realizado sem considerar as forças cisalhantes entre as fatias, focando apenas no equilíbrio de momentos. Isso não significa que as forças de cisalhamento sejam inexistentes, mas sim que um dos termos da equação de equilíbrio de momentos é considerado como zero. Em outras palavras, é adotada uma distribuição ajustada das forças cisalhantes verticais entre as fatias, de modo a garantir o equilíbrio das forças horizontais (ZHU, 2008).

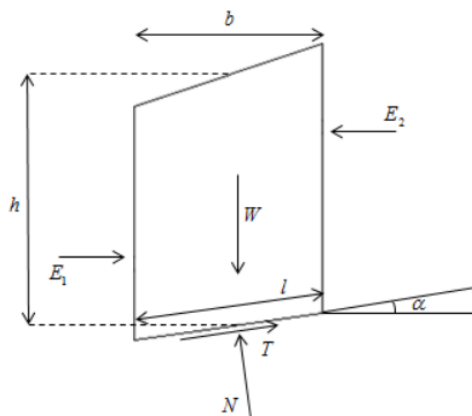


Figura 7. Método de Bishop – Forças aplicadas a uma fatia de solo.
Fonte: Ferreira (2012)

O cálculo do fator de segurança é feito de forma iterativa e é dado pela seguinte expressão:

$$FS = \frac{\sum \left(c \times l + \left(\frac{W - u \times b - (c \times b \times \tan \alpha) / FS}{\cos \alpha + (\tan \phi' \times \sin \alpha) / FS} \right) \times \tan \phi' \right)}{\sum W \sin \alpha} \quad (4)$$

Segundo Ferreira (2012), o método de Janbu simplificado não considera as forças normais e de cisalhamento entre as fatias, sendo baseado apenas no equilíbrio de forças. A figura 8 apresenta um esquema de como o método de Janbu simplificado considera as forças aplicadas a uma fatia de solo. A reação normal na base da fatia é calculada considerando o equilíbrio de forças na direção vertical.

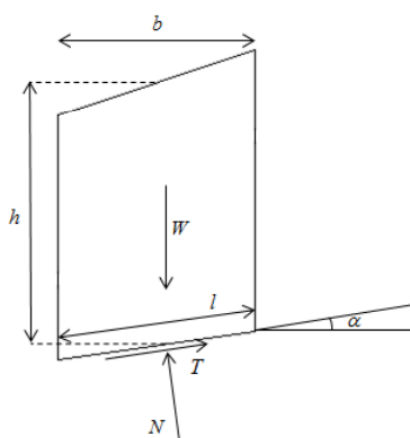


Figura 8. Método de Janbu simplificado – Forças aplicadas a uma fatia de solo.
Fonte: Ferreira (2012)

O cálculo do fator de segurança é feito de forma iterativa e é dado pela seguinte expressão:

$$FS = \frac{1}{\sum W \tan \alpha} \times \sum \left[[c' \times b + (W - u \times b) \tan \phi'] \frac{\sec^2 \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha \times \tan \phi'}{FS}} \right] \quad (5)$$

O Método de Morgenstern-Price (1965) é considerado um dos métodos mais rigorosos de análise de estabilidade de taludes e é o único método clássico que pode ser aplicado qualquer superfície de ruptura. Além disso, esse método abrange todas as condições de equilíbrio. A figura 9 apresenta um esquema de como o método de Morgenstern-Price considera as forças aplicadas a uma fatia de solo (FERREIRA, 2012).

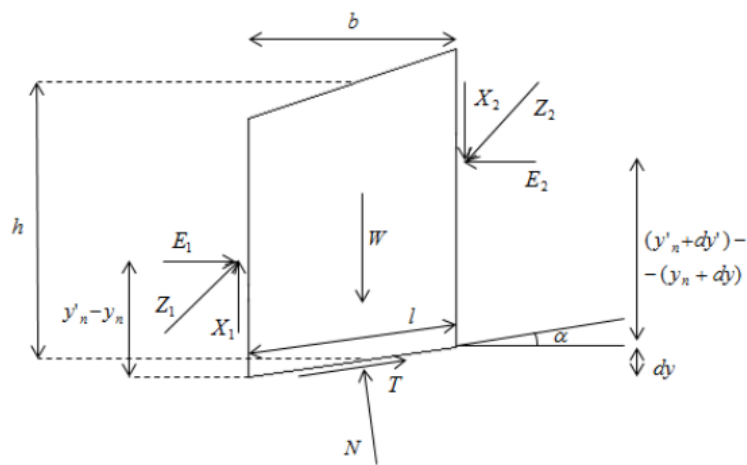


Figura 9. Método de Morgenstern-Price – Forças aplicadas a uma fatia de solo.
Fonte: Ferreira (2012)

A aplicação do método recorre a equações diferenciais que governam o equilíbrio de momentos (equação 6) e o equilíbrio de forças numa fatia (equação 7).

$$(y'_1 - y_1) \frac{dE}{b} + E_1 \frac{dy'}{b} - X_1 = 0 \quad (6)$$

$$\frac{c'}{FS} [1 + \tan^2 \alpha] + \frac{\tan \phi'}{FS} \left[\frac{dW}{b} + \frac{dX}{b} - \frac{dE}{b} \tan \alpha - u \times (1 + \tan^2 \alpha) \right] = \frac{dE}{b} + \frac{dX}{b} \tan \alpha + \frac{dW}{b} \tan \alpha \quad (7)$$

Essas equações contêm três incógnitas: as forças de interação entre as fatias (X e) e a posição da linha de pressão (y'). Portanto, o problema é estaticamente indeterminado. Para tornar o problema estaticamente determinado, Morgenstern e Price introduziram uma função arbitrária que descreve a variação da relação entre X e, juntamente com um fator de escala λ (FERREIRA, 2012).

$$X = \lambda \times f(x) \times E \quad (8)$$

Para se chegar ao valor do fator de segurança e de λ procede-se à integração das equações diferenciais 6 e 7 e efetua-se um processo iterativo através do método de Newton-Raphson.

Devido a esse rigor e todas as considerações deste método, ele será utilizado como o método de análise neste estudo.

Independentemente do método escolhido, deve-se atentar para que o Fator de Segurança atenda ao preconizado pela norma NBR 116829 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2009), a qual prescreve os requisitos exigíveis para o estudo e controle da estabilidade de encostas e de taludes resultantes de cortes e aterros realizados em encostas.

2.5 Estabilização de taludes

A estabilização de taludes e encostas é uma prática fundamental na engenharia geotécnica para prevenir deslizamentos ou evitar que novos deslizamentos aconteçam, de forma a garantir a segurança de estruturas e áreas próximas. Existem diversos métodos de estabilização disponíveis, cada um adequado a diferentes condições geológicas e geotécnicas.

A primeira das intervenções que deve ser pensada para estabilização de um talude é sua drenagem. Isto porque a drenagem é essencial para reduzir a pressão hidrostática no solo e aumentando a sua resistência ao cisalhamento. Dependendo da situação, deve-se realizar a instalação de drenos horizontais ou verticais pode ser realizada para controlar o fluxo de água e prevenir a saturação do solo (FREDLUND et al., 2012).

Nem sempre a estabilização de talude precisa ser realizada com a estruturas de contenção. Como já mencionado anteriormente, cada situação deve ser cuidadosamente analisada e, a partir desta análise, escolhida a melhor opção que satisfaça tanto as condições técnicas e econômicas.

A terraplenagem e o retaludamento consistem na modificação da geometria do talude para reduzir as tensões no solo e aumentar a sua estabilidade. Essas técnicas podem envolver o aumento da inclinação do talude, a criação de bancadas ou a modificação da forma da encosta (DAS, 2007).

A bioengenharia utiliza técnicas de engenharia e vegetação para estabilizar taludes e encostas. A vegetação é utilizada para aumentar a resistência do solo, reduzir a erosão e controlar a drenagem, contribuindo para a estabilidade do talude (GALO, 2017).

Essa proteção de taludes, visando reduzir o impacto da gota de chuva, que deflagra o processo erosivo, também pode ser realizada com a utilização de biomantas, geomantas ou também com concreto projetado.

Quando a situação não consegue ser resolvida com o retaludamento ou com a proteção superficial desses taludes, opta-se pelas estruturas de contenção que podem ser através dos muros de contenção ou o grampeamento dos taludes.

Os muros de contenção são estruturas construídas ao longo do pé do talude para suportar o solo e prevenir deslizamentos. Eles podem ser construídos com concreto, pedra ou solo reforçado e são projetados para resistir às pressões exercidas pelo solo (VARGAS, 2013).

Já o grampeamento de taludes envolve a instalação de tirantes ou grampos no talude para aumentar a sua estabilidade. Esses elementos estruturais são ancorados no solo ou na rocha e podem ser utilizados para estabilizar taludes rochosos ou de solo (Duncan et al., 1999).

3. METODOLOGIA

3.1 Localização da região em estudo

A região do estudo está localizada em uma área de mineração, próximo a uma barragem. A Figura 10 apresenta a localização da região e seu entorno.

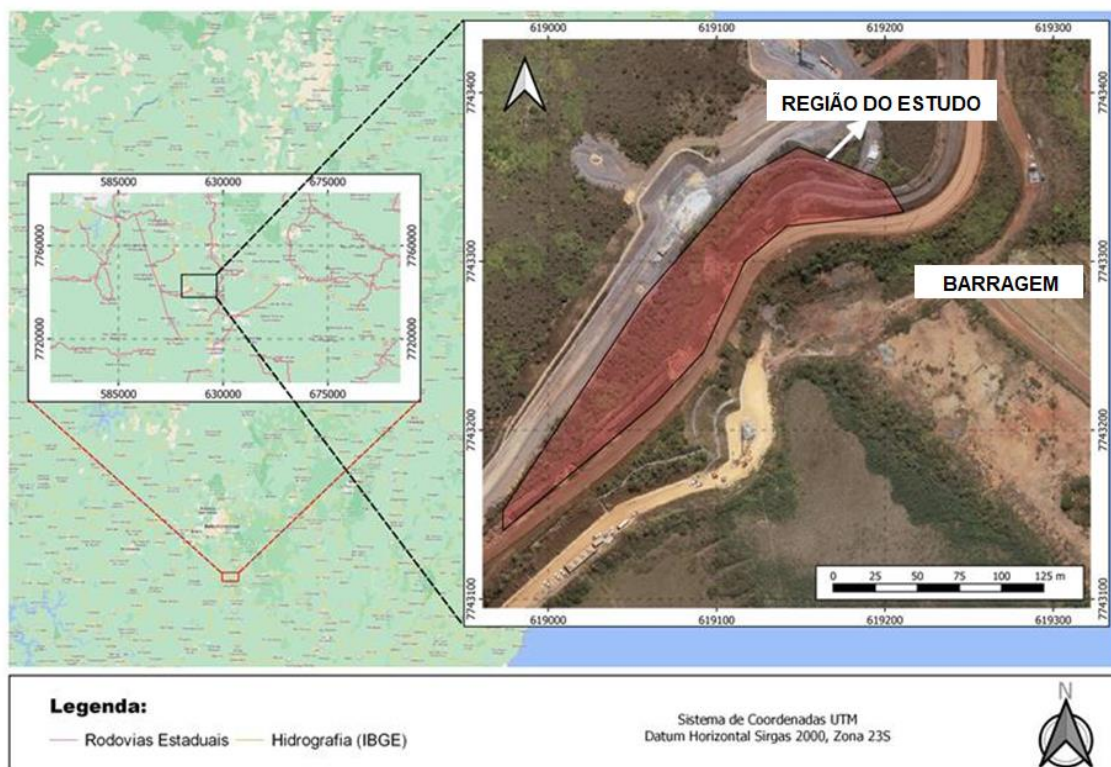


Figura 10 - Localização da região do estudo.

Foi realizada uma visita técnica no dia 02/02/2023, na qual observou-se que, na região em estudo, estava sendo realizada a construção de um muro de gabião em um trecho, anterior a este estudo (Figura 11a), além da presença de um gabião já existente no local, como apresentado na Figura 11b.



Figura 11 - a) Gabião sendo executado; b) Gabião existente.

Além disso, verificou-se que na área existem escorregamentos, e erosões que provocaram a obstrução da drenagem superficial localizada em alguns pontos, conforme Figura 12.



Figura 12 - Drenagem Superficial obstruída.

Também foi observado que um trecho da área em estudo estava sendo retalhada (Figura 13).



Figura 13 - Retaludamento executado em parte da área em estudo.

Como a região apresentava vários pontos com erosão ou escorregamento, dividiu-se a mesma em 7 (sete) áreas de forma a propor as soluções de cada uma de forma individual e mais assertiva. As áreas foram nomeadas como área 1, área 2, área 3, área 4, área 6 e área 7. A figura 14 apresenta a imagens das sete áreas que fazem parte da região do estudo.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 14 - Áreas da região em estudo: (a) Área 1; (b) Área 2; (c) Área 3; (d) Área 4; (e) Área 5; (f) Área 6 e (g) Área 7.

3.2 Levantamento Topográfico

Para a realização deste estudo, utilizou-se o levantamento topográfico da área de implantação disponibilizado mineradora. Na Figura 15 é apresentada uma imagem de satélite da área em estudo com a projeção da base topográfica fornecida.

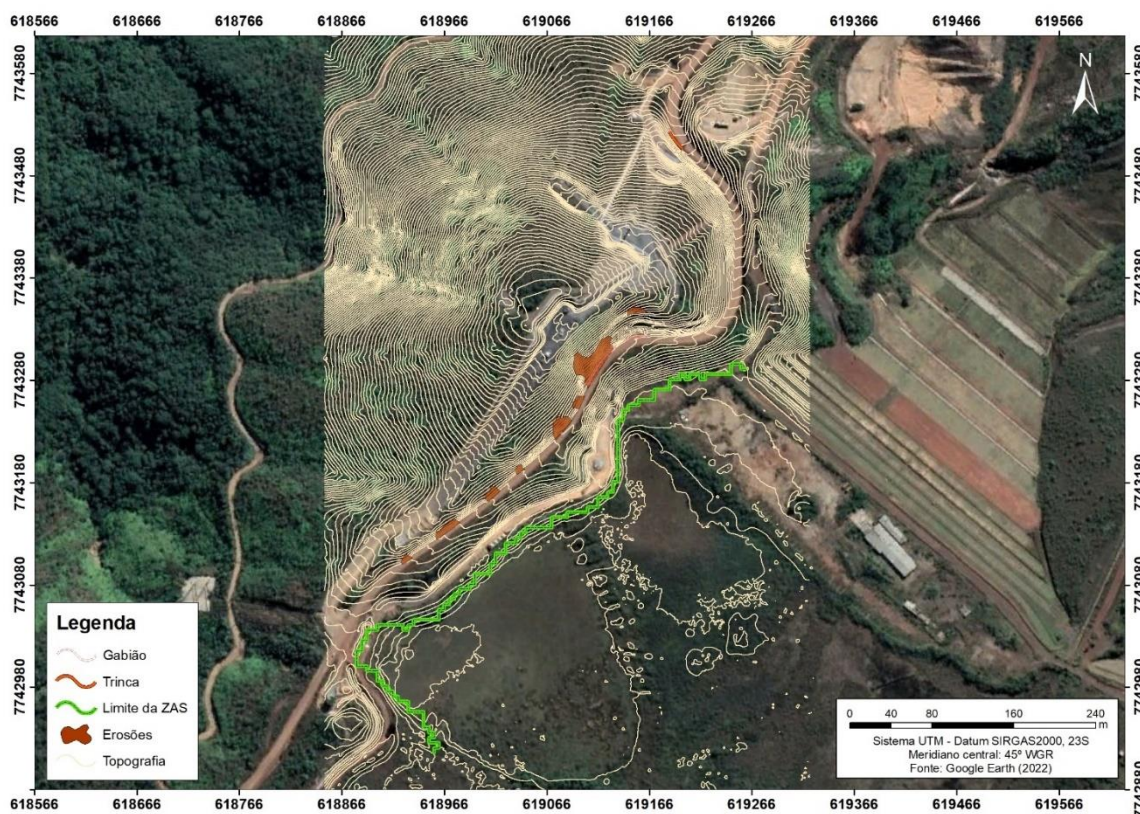


Figura 15 - Levantamento topográfico da área da região do estudo.

3.3 Parâmetros Geotécnicos Adotados

Para as análises de estabilidade, foram adotados os parâmetros geotécnicos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros geotécnicos adotados para os materiais.

MATERIAL	COR	PESO ESPECÍFICO (kN/m ³)	c' (kPa)	φ' (°)
Solo residual de Filito		18	5	28
Saprólito de Filito		20	18	30
Gabião		20	-	-

Destaca-se que o nível d'água e os parâmetros geotécnicos utilizados na análise de estabilidade foram determinados com base nas sondagens fornecidas pela mineradora, bem como nas observações em campo.

3.4 Estudos Realizados

Foram realizados estudos geológicos-geotécnicos com objetivo de verificação e dimensionamento da solução proposta para o retaludamento e contenção dos taludes por meio de análises de estabilidade.

As análises de estabilidade foram realizadas no software Slide 2. Para o cálculo do fator de segurança de potenciais superfícies de ruptura, foram considerados: superfícies de ruptura do tipo circular; método do equilíbrio limite de Morgenstern-Price e critério de resistência de Mohr-Coulomb.

Destaca-se que foi considerado para as rupturas a nível local e global o fator de segurança mínimo de 1,5, de forma que os taludes atendessem ao fator de segurança mínimo preconizado pela NBR 11.682:2009, considerando alto tanto o nível de segurança contra dano ambiental quanto o nível de segurança contra danos a vidas humanas, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Fatores de segurança mínimos conforme a NBR 11.682(ABNT, 2009).

NÍVEL DE SEGURANÇA CONTRA DANOS MATERIAIS E AMBIENTAIS	NÍVEL DE SEGURANÇA CONTRA DANOS E VIDAS HUMANAS		
	ALTO	MÉDIA	BAIXO
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Nas análises de estabilidade foram considerados dois cenários distintos, o cenário 1 considerando a geometria atual e o cenário 2 considerando a solução proposta.

Na Figura 16 é apresentada a localização das seções consideradas para as análises dos cenários mencionados. A seção A-A', corresponde a área 1, a seção B-B' corresponde à área 2, a seção C-C', corresponde à área 3, a seção D-D', corresponde à área 4, a seção E-E', corresponde à area 5, a seção F-F', corresponde à área 6 e a seção G-G' corresponde à área 7.

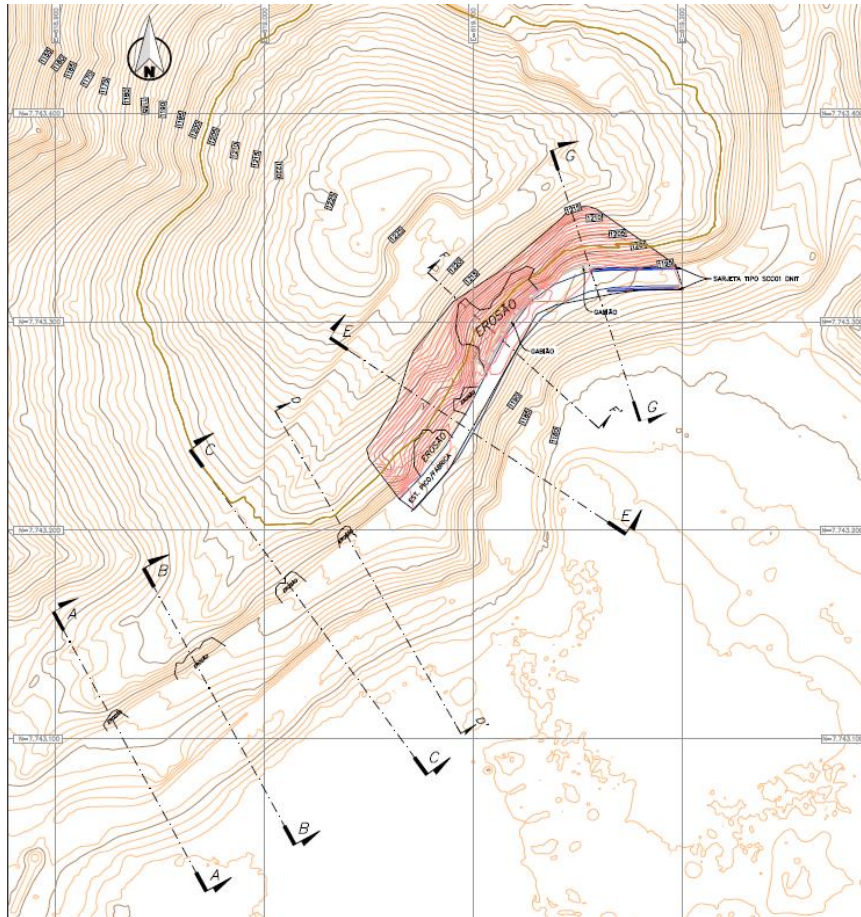


Figura 16 - Localização das seções de análise.

Os modelos computacionais das análises do cenário 1 estão apresentados nas Figuras 17 a 23. Ressalta-se que foi considerado em todos os modelos um carregamento de 25 kN/m² pois na porção à montante destes taludes existe um acesso onde há tráfego de veículos.

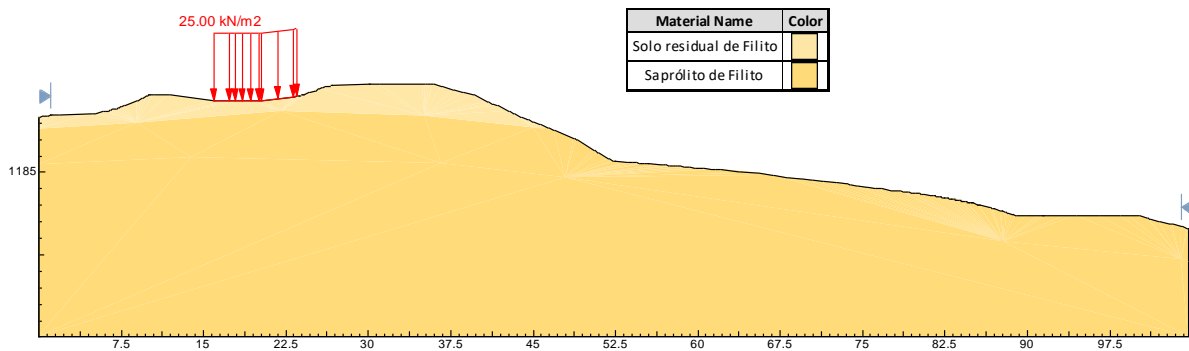


Figura 17 - Modelo computacional para o Cenário 1 – Seção A-A'.

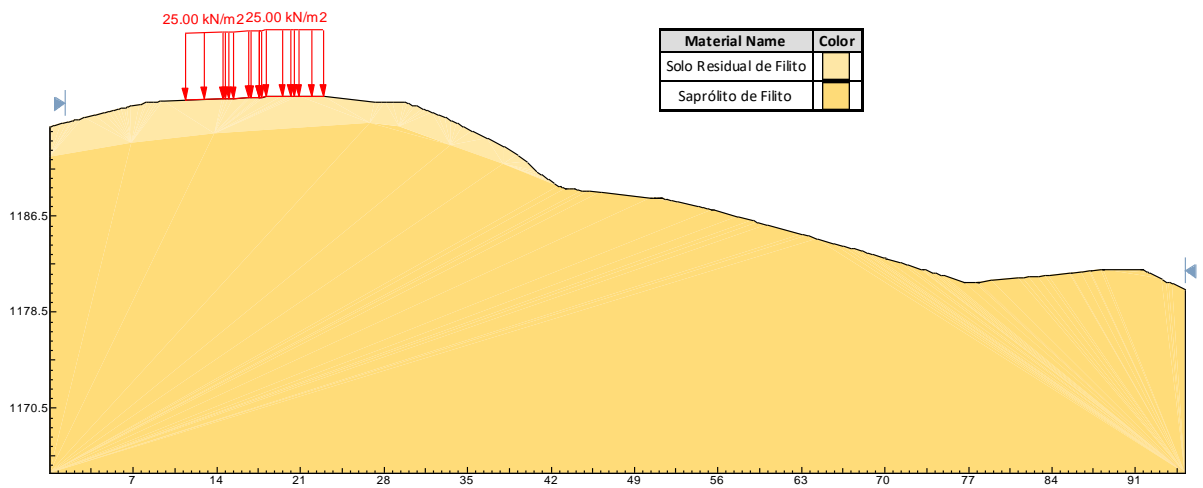


Figura 18 - Modelo computacional para o Cenário 1 – Seção B-B'.

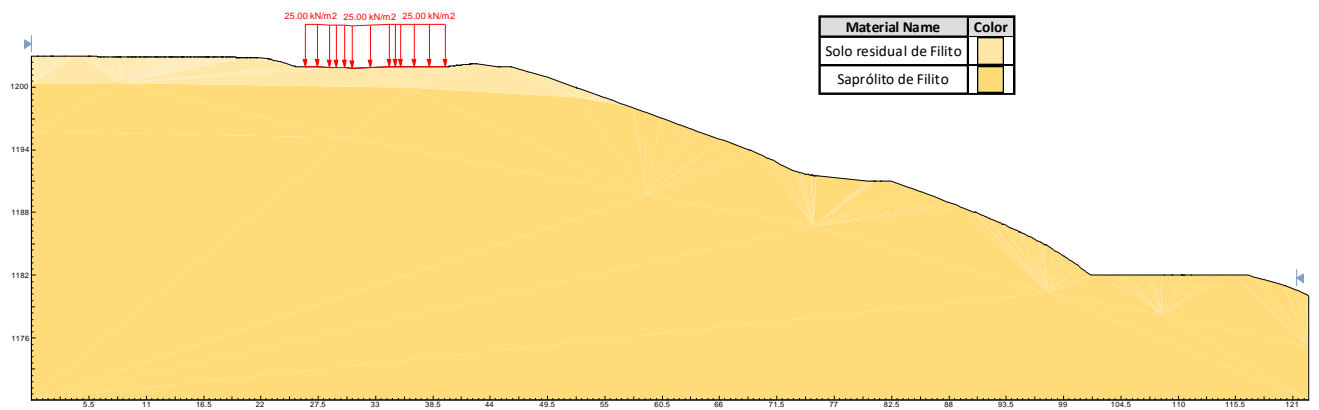


Figura 19 - Modelo computacional para o Cenário 1 – Seção C-C'.

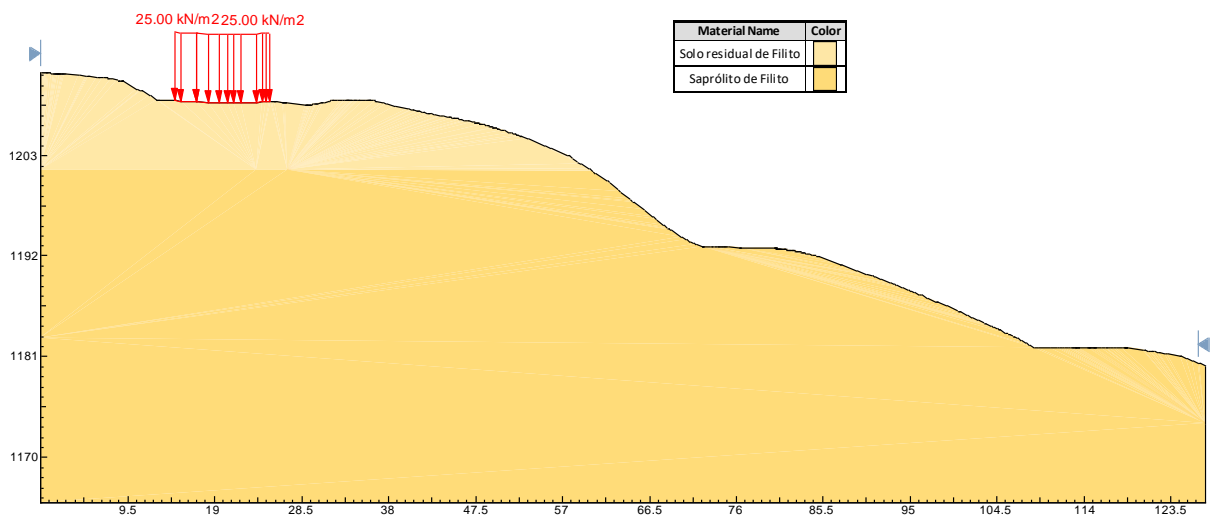


Figura 20 - Modelo computacional para o Cenário 1 – Seção D-D'.

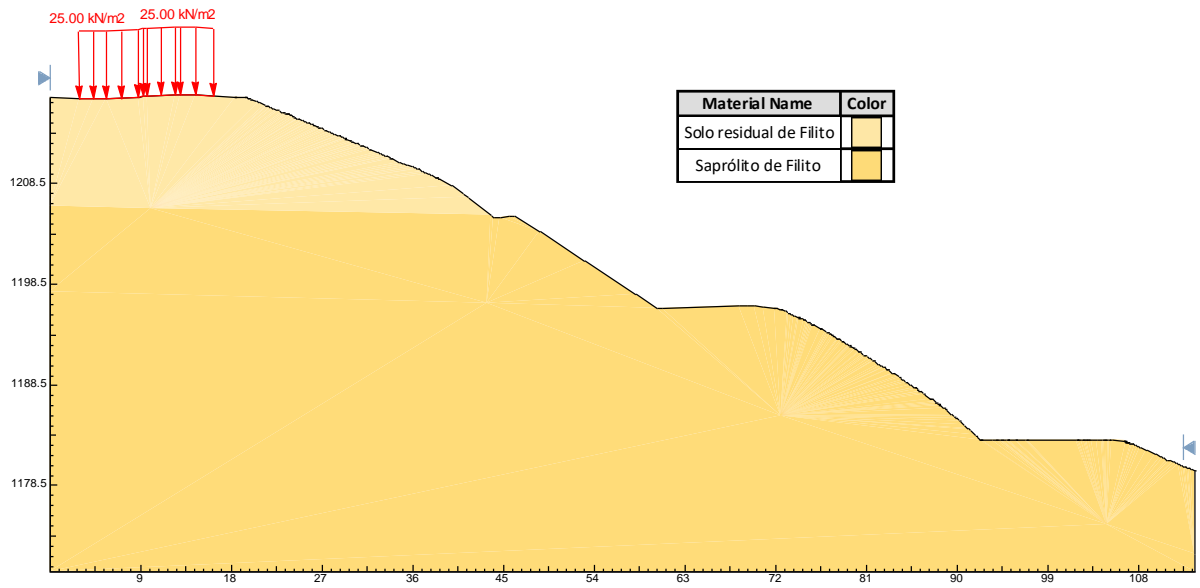


Figura 21 - Modelo computacional para o Cenário 1 – Seção E-E'.

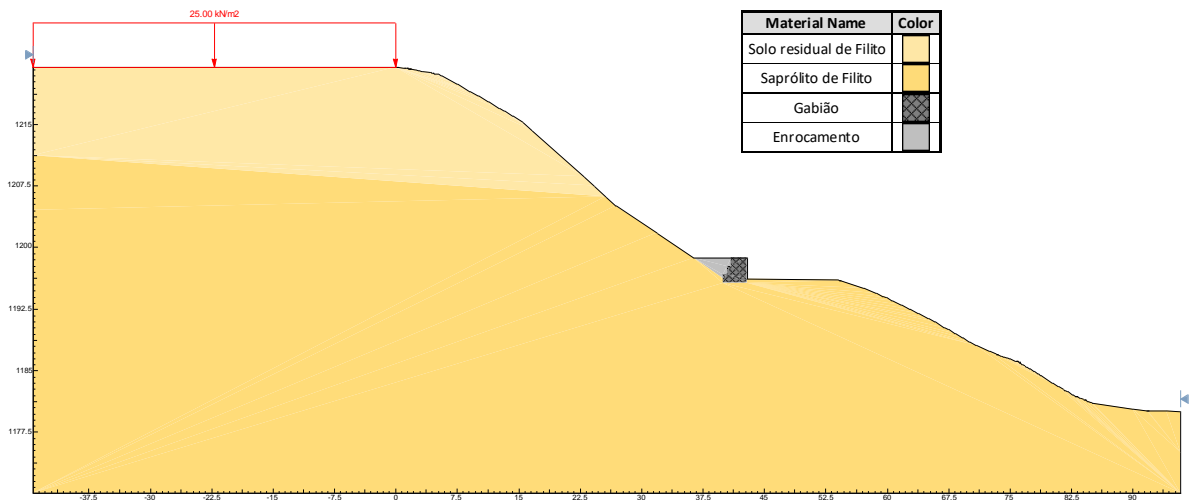


Figura 22 - Modelo computacional para o Cenário 1 – Seção F-F'.

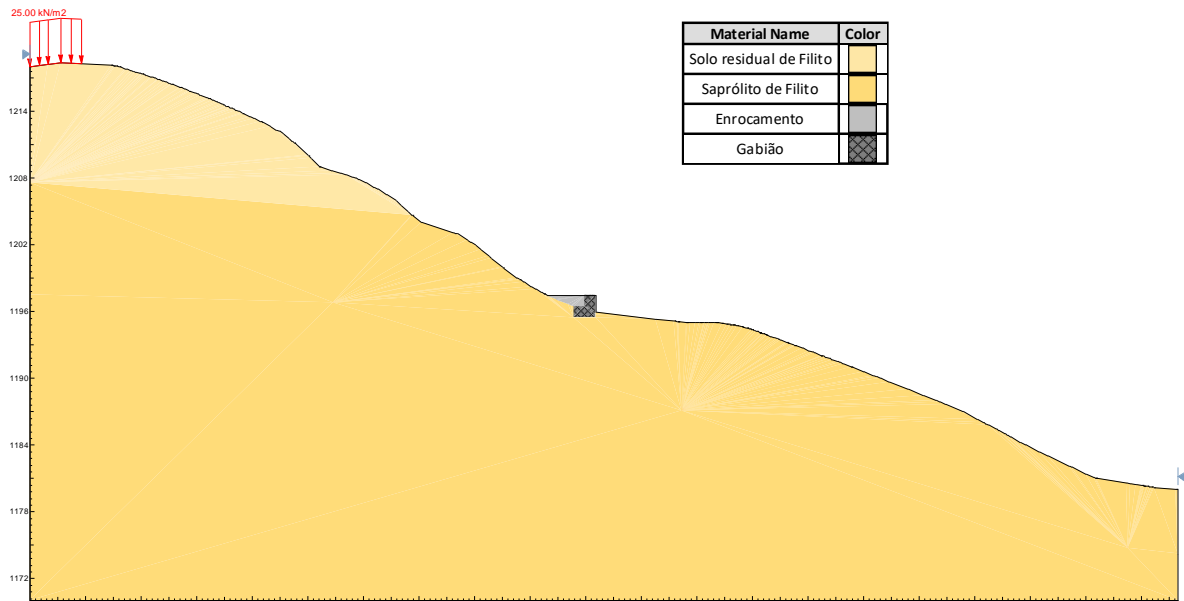


Figura 23 - Modelo computacional para o Cenário 1 – Seção G-G’.

4. RESULTADOS

4.1 Análise de Estabilidade para a Condição Atual

As análises de estabilidade para as áreas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 6, seções A-A’, B-B’, C-C’, D-D’, E-E’, F-F’ e G-G’, respectivamente, utilizando o método do equilíbrio limite de Morgenstern-Price, são apresentadas nas Figura 24 a Figura 30.

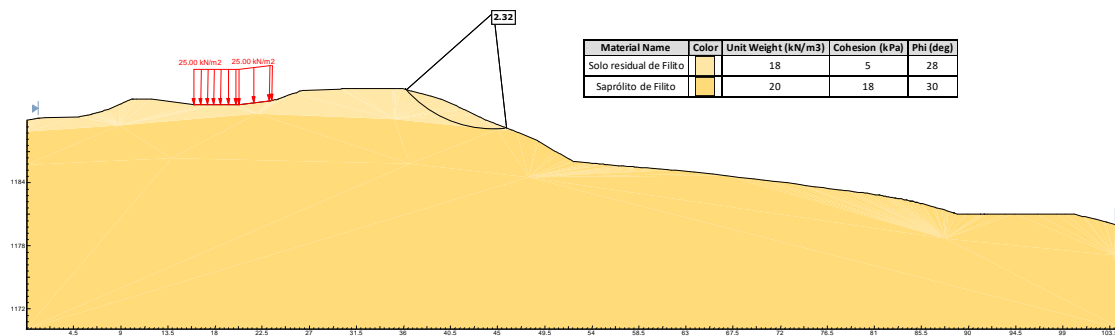


Figura 24 - Análise de estabilidade – Seção A-A’ – Condição atual – Cenário 1.

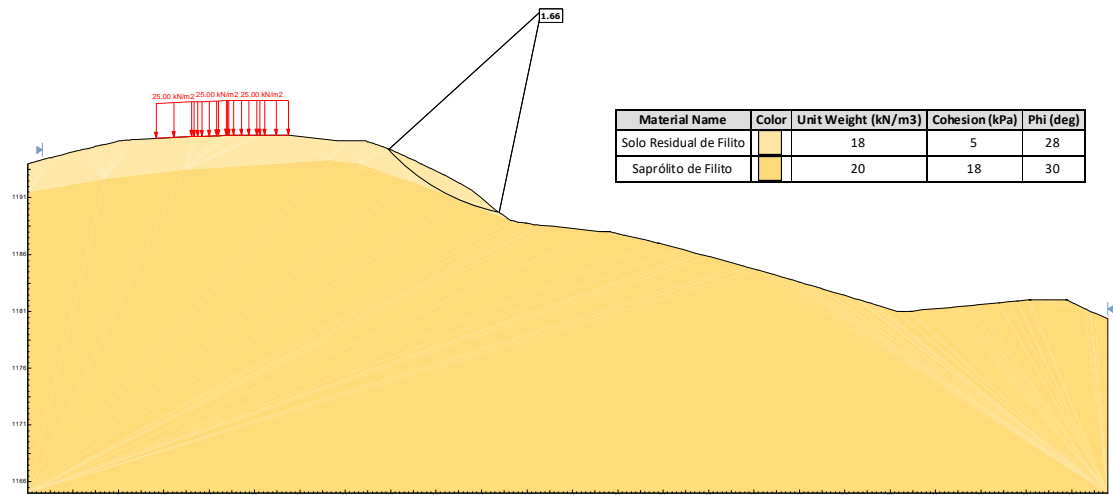


Figura 25 - Análise de estabilidade – Seção B-B' – Condição atual – Cenário 1.

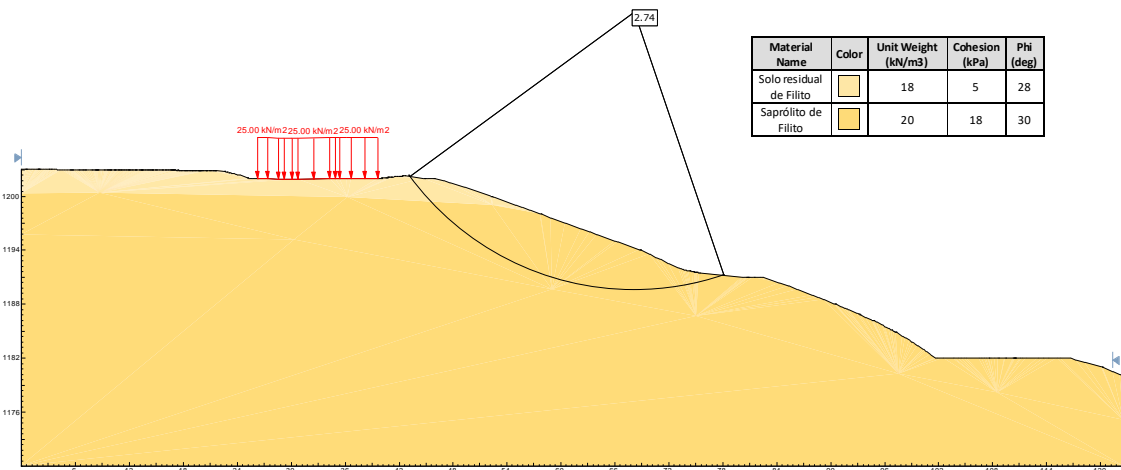


Figura 26 - Análise de estabilidade – Seção C-C' – Condição atual – Cenário 1.

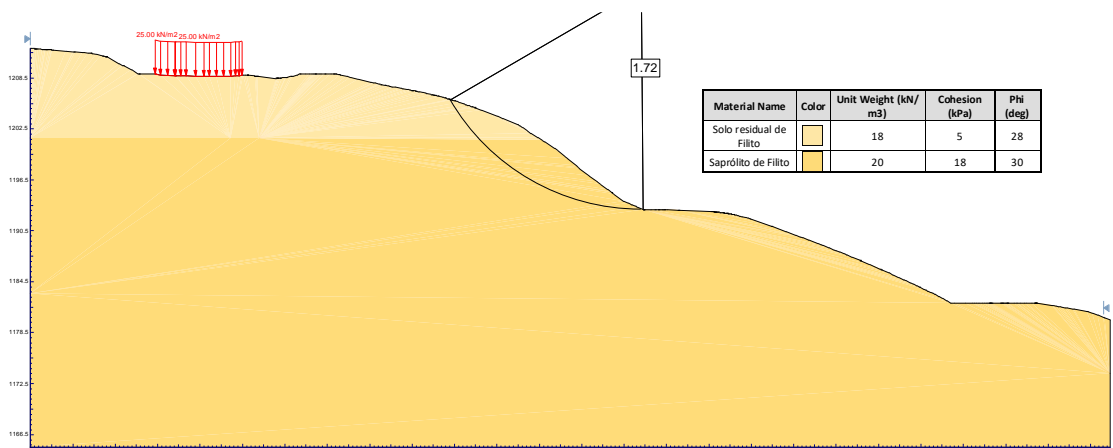


Figura 27 - Análise de estabilidade – Seção D-D' – Condição atual – Cenário 1.

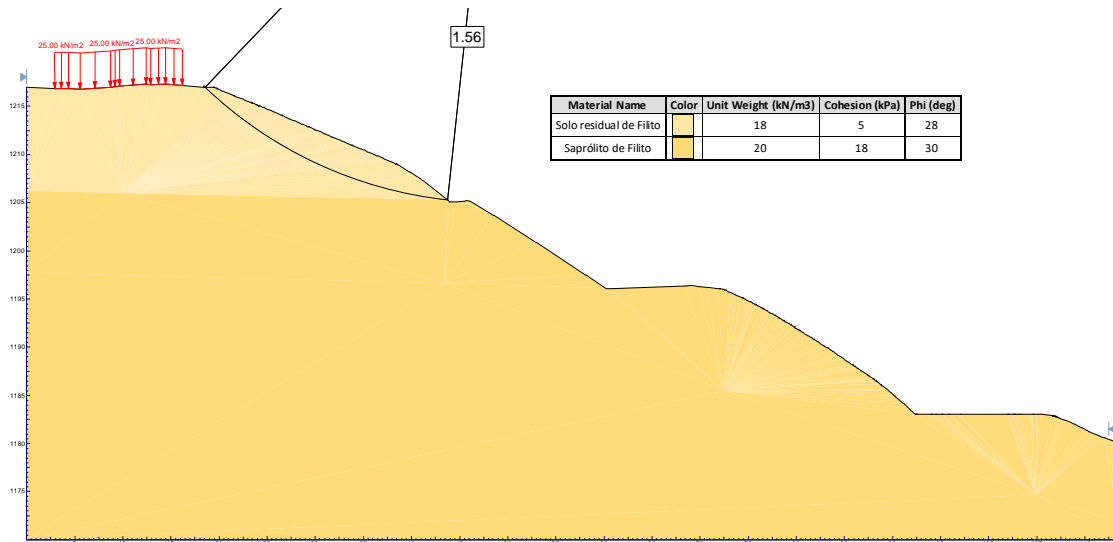


Figura 28 - Análise de estabilidade – Seção E-E' – Condição atual – Cenário 1.

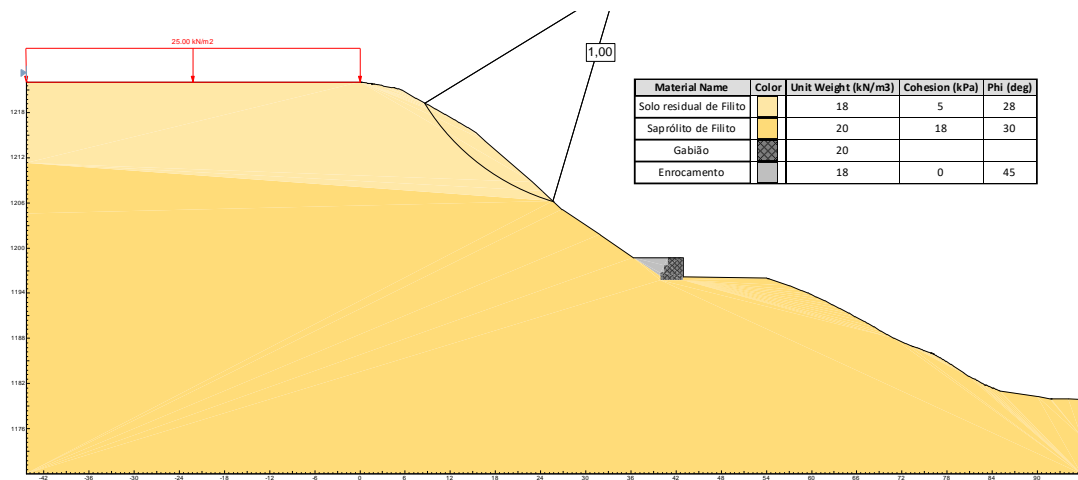


Figura 29 - Análise de estabilidade – Seção F-F' – Condição atual – Cenário 1.

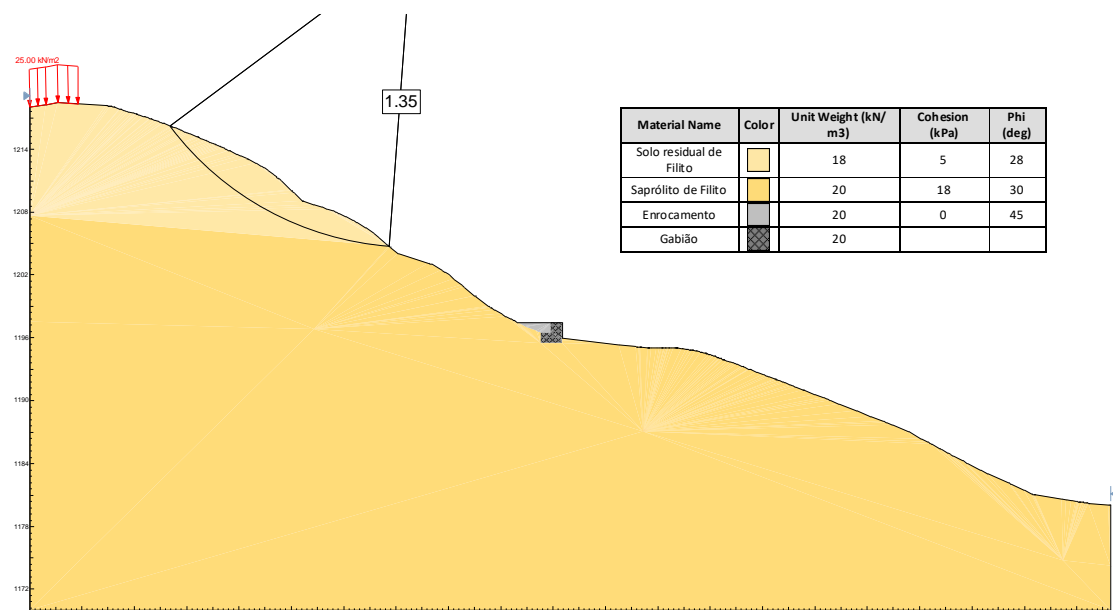


Figura 30 - Análise de estabilidade – Seção G-G’ – Condição atual – Cenário 1.

A Tabela 3 apresenta um resumo das análises de estabilidade realizadas para a condição atual nas seções A-A’, B-B’, C-C’, D-D’, E-E’, F-F’ e G-G’ apresentadas nas Figuras 24 a Figura 30.

Tabela 3 - Resumo das análises de estabilidade realizadas para a condição atual.

SEÇÃO	FS MÍNIMO ADMISSÍVEL ⁽¹⁾	FS MÍNIMO OBTIDO	ATENDE
Seção A-A’	1,50	2,32	Sim
Seção B-B’	1,50	1,66	Sim
Seção C-C’	1,50	2,74	Sim
Seção D-D’	1,50	1,56	Sim
Seção E-E’	1,50	1,56	Sim
Seção F-F’	1,50	1,00	Não
Seção G-G	1,50	1,35	Não

Nota:

(1) – FS mínimo admissível conforme preconizado na NBR 11682 (ABNT, 2009).

Cabe ressaltar que o FS mínimo admissível na Tabela 11.2 leva em consideração o nível de segurança contra danos ambientais alto e nível de segurança contra perdas de vidas humanas alto, presentes na NBR 11.682 (ABNT, 2009).

Verifica-se que para os taludes das áreas 1, 2, 3, 4 e 5 (Seções A-A’, B-B’, C-C’, D-D’ e E-E’), as análises de estabilidade na condição atual resultaram em fatores de segurança superiores a 1,5, atendendo ao preconizado pela legislação vigente (NBR 11682, ABNT (2009)). Entretanto, apesar dessas áreas não apresentarem instabilização física, como estão localizadas em acessos dentro da área de mineração, foram propostas soluções com cunho de proteção superficial e proteção desse acesso a eventos de erosão e quedas de sedimentos.

Para as áreas 6 e 7 (Seções F-F’ e G-G’), os fatores de segurança encontrados na condição atual foram inferiores a 1,5, necessitando, portanto, de uma proposta de estabilização.

4.2 Dimensionamento dos grampos

Nas áreas 6 e 7 (seções F-F’ e G-G’), como mencionado anteriormente, foi necessário propor uma estabilização, neste caso, foi indicado a utilização de solo grampeado.

Para isso, foi necessário dimensionar os grampos que seriam utilizados nestas duas áreas. Como os parâmetros de entrada solicitados pelo Slide, *software* utilizado para as análises de estabilidade, são *Tensile Capacity* (kN) e *Bond Strength* (kN/m), adotou-se 136,5 kN para *Tensile Capacity*, conforme ilustrado na equação a seguir. E para *Bond*

Strength utilizou-se como referência os valores do banco de dados da SOLOTRAT, considerando para esse estudo o valor de 16 kN/m.

Assim, a carga última da armação do grampo utilizado, foi obtida a partir da equação a seguir:

$$\begin{aligned} T_{\text{último}} &\leq A_s * f_{yk} / \gamma_s \\ T_{\text{último}} &\leq \pi * 0,01^2 * 5 * \frac{10^5}{1,15} \\ &\leq 136,5 \text{ kN} \end{aligned}$$

Em que:

$T_{\text{último}}$ = É a carga última da armação do grampo utilizado no ensaio (kN);

A_s = É a área da seção transversal da armação do grampo (m²);

f_{yk} = É a tensão de escoamento característica do aço empregado (kPa); e

γ_s = É o coeficiente de minoração da resistência da armação do grampo, para barras de aço.

Ressalta-se que foi considerado o grampo com 20 mm de diâmetro e aço CA-50.

4.3 Concepção do Projeto

Para as áreas 1, 2, 3 e 4 que apresentaram apenas escorregamentos superficiais, foi indicada uma solução que consiste na proteção superficial em rip-rap e muro de gabião, visando a proteção do acesso.

Para a área 5, foi proposta a proteção superficial com biomanta e plantio de grama por hidrossemeadura.

Para a área 6 foi proposta a execução de solo grampeado com proteção superficial em concreto projetado. E para a área 7 foi proposto o retaludamento, com a execução de solo grampeado no talude superior e nos taludes inferiores, proteção superficial com concreto projetado ao longo de toda a extensão. Na Figura 31 é ilustrado o arranjo geral da solução.

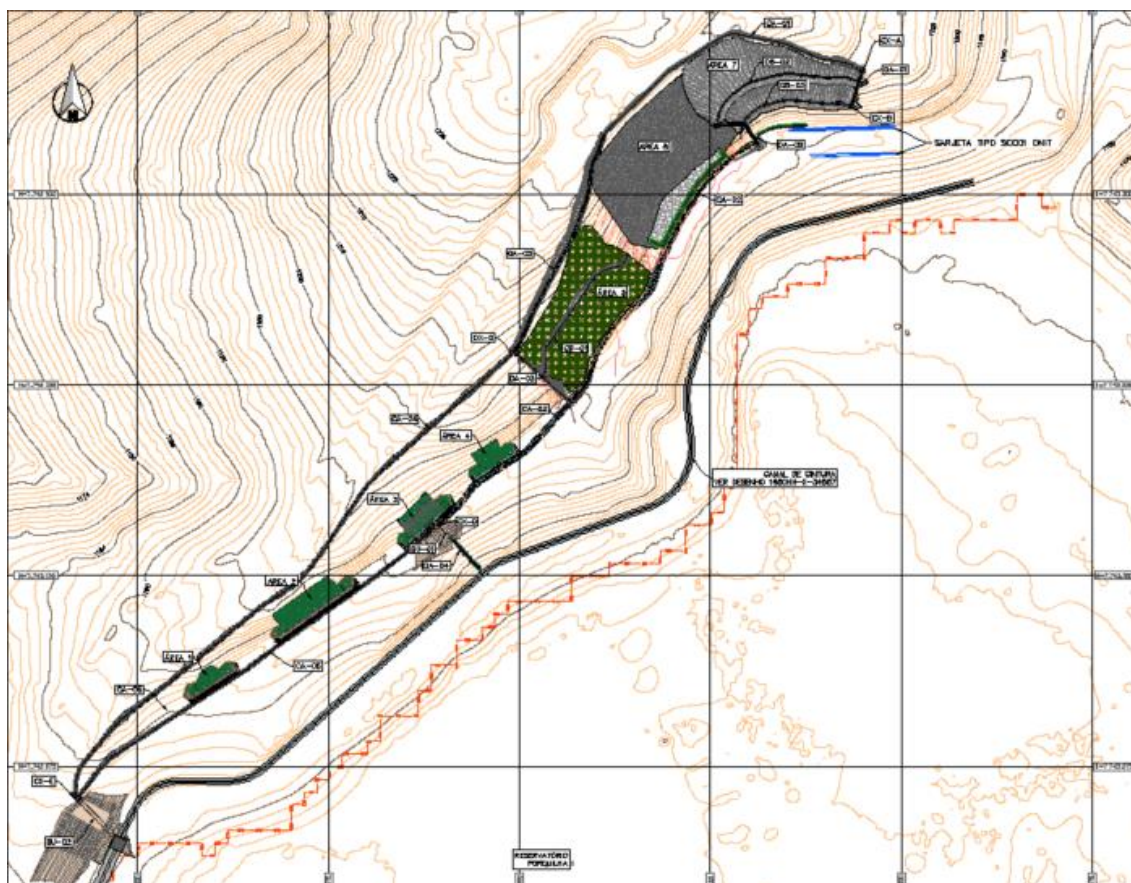


Figura 31 - Arranjo geral.

4.3.1 Proteção Superficial em Rip-Rap

O rip-rap proposto como proteção superficial do talude, irá possuir aproximadamente 2,5 m de altura com inclinação de 1V:1,5H, conforme apresentado na Figura 32. Esta solução foi aplicada nas áreas 1, 2, 3 e 4. Destaca-se que o espaço entre o gabião e o rip-rap foi projetado para ser uma área de contenção de sedimentos, logo, foi projetado sem preenchimento.

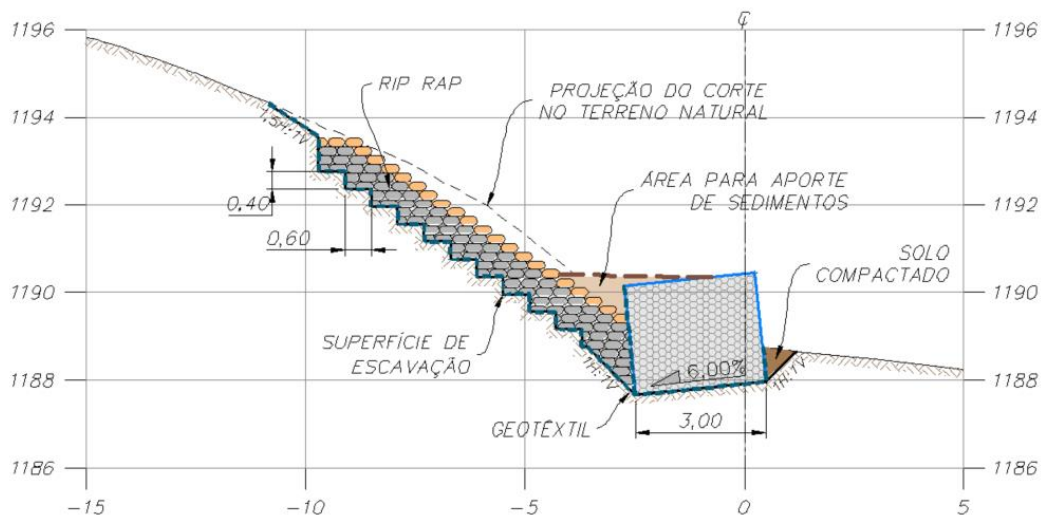


Figura 32 - Seção típica.

Destaca-se que a última “fileira” deverá ser protegida com os sacos previamente preenchidos com mix de solo e sementes, de forma a proteger superficialmente o talude e reconectando-o ao meio ambiente, conforme ilustrado na Figura 33.

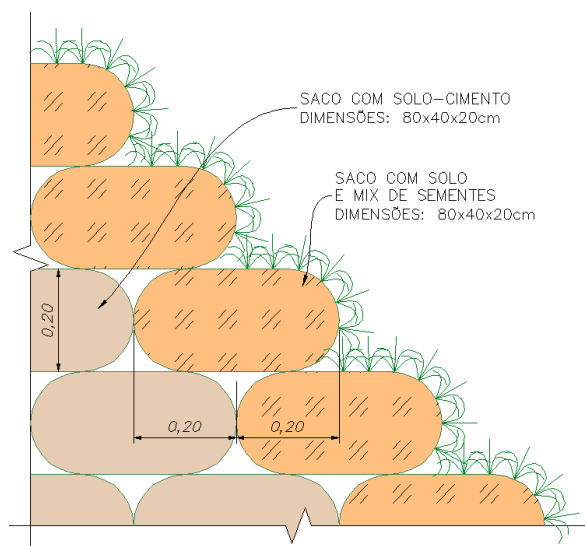


Figura 33 - Seção típica do rip-rap.

4.3.2 Muro de Contenção em Gabião

A estrutura de contenção em gabião, proposta para as áreas 1, 2, 3 e 4, apresenta altura final igual a 2,5 m, sendo constituída, por 2 camadas de 1,0 m de espessura e 1 camada de 0,5 m de espessura. Com o intuito de trazer sustentação e estabilidade em relação ao deslizamento e tombamento, o gabião será ancorado em 0,5 m de profundidade e instalado com inclinação de 6°, conforme apresentado na Figura 34

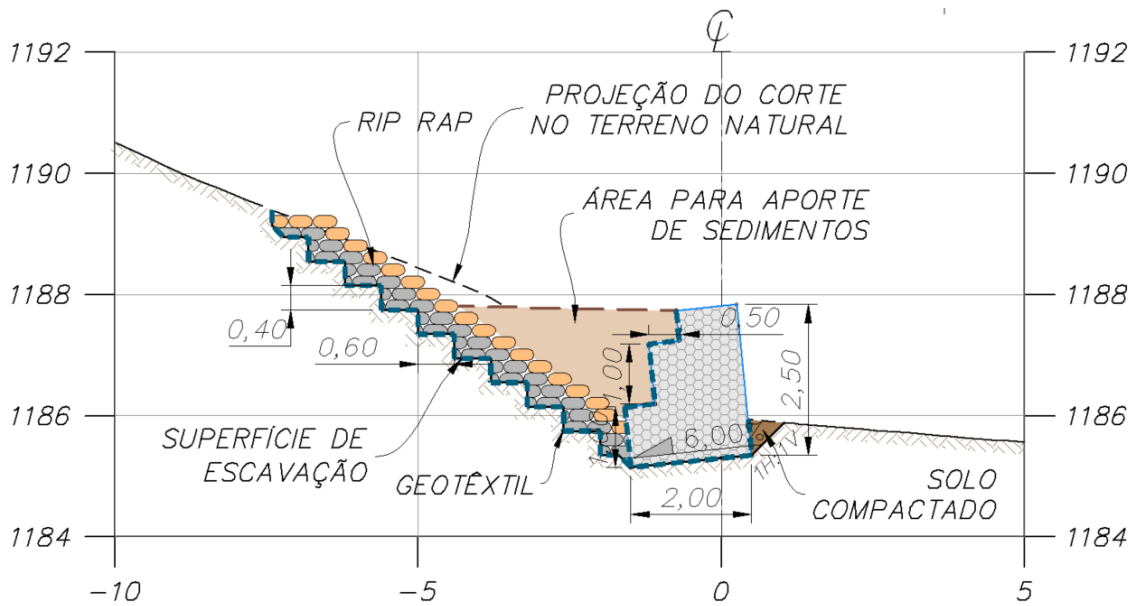


Figura 34 – Seção típica.

Importante salientar que, como mencionado anteriormente, o espaço entre o gabião e o rip-rap foi projetado para ser uma área de contenção de sedimentos, logo, foi projetado sem preenchimento.

Também se reforça que o tardo do gabião e o trecho entre o gabião e o solo compactado, deve ser transicionado por geotêxtil a fim de evitar carreamento de partículas finas e posterior colmatação dos vazios do gabião.

4.3.3 Retaludamento

Para a área 7 (Seção G-G'), foi proposto um retaludamento, de forma a representar melhor o que foi visualizado no campo durante as visitas técnicas e permitir a proposta da drenagem, uma vez que as topografias fornecidas não estavam muito representativas.

A geometria do talude existente deverá ser reconformada de tal forma a obter inclinações de 1,4H:1,0V, nos taludes superiores, com altura do talude superior de no máximo 14,82 m, largura de bermas de 3,0 m e o talude intermediário com altura de 5,0 m, conforme ilustrado na Figura 35. Essa permite a remoção de processos erosivos existentes, a melhor representação da geometria visualizada em campo e a implantação da drenagem.

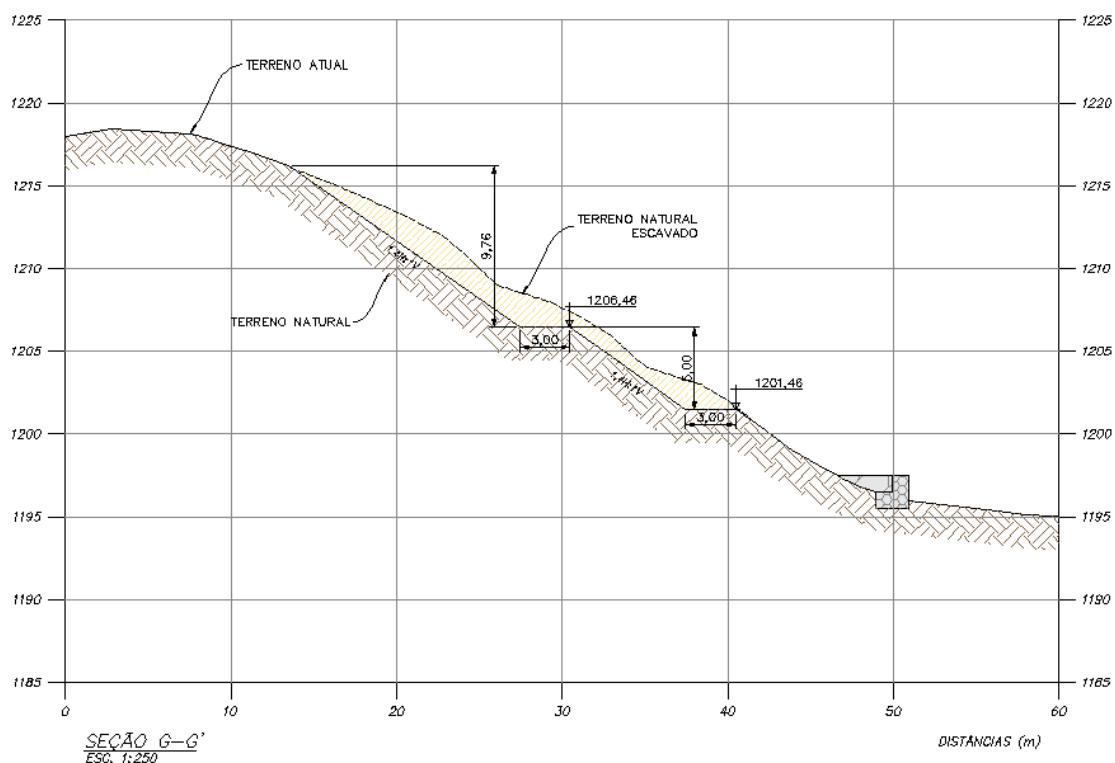


Figura 35 - Retaludamento proposto – Seção G-G’.

4.3.4 Solo Grampeado

Para as áreas 6 e 7, foi proposta a execução de solo grampeado, para garantir a estabilidade do talude e os fatores de segurança mínimos, conforme preconizado pela ABNT NBR 11.682 (ABNT, 2009).

O solo grampeado para a área 6, foi proposto com espaçamento de 1,5 m x 1,5 m e comprimento de 12 m. Na Tabela 4 são apresentadas as demais dimensões adotadas.

Tabela 4 - Dimensões do grupo proposto para a área 6.

Espaçamento vertical (m)	1,5
Espaçamento horizontal (m)	1,5
Comprimento (m)	12
Inclinação (°)	20,0
Diâmetro da barra (mm)	20,0
Tipo de aço	CA-50

O solo grampeado para a área 7 proposto com espaçamento 1,5 m x 2,0 m e comprimento de 12 m para os grampos superiores (4 fileiras) e 6,0 m para os grampos inferiores. Na Tabela 5 são apresentadas as demais dimensões adotadas.

Tabela 5 - Dimensões do grampo proposto para a área 7.

Espaçamento vertical (m)	1,5
Espaçamento horizontal (m)	2,0
Comprimento (m)	12 e 6
Inclinação (°)	20,0
Diâmetro da barra (mm)	20,0
Tipo de aço	CA-50

Na Figura 36 é apresentada uma seção típica da solução adotada para a área 6 e na Figura 37 a solução adotada para a área 7.

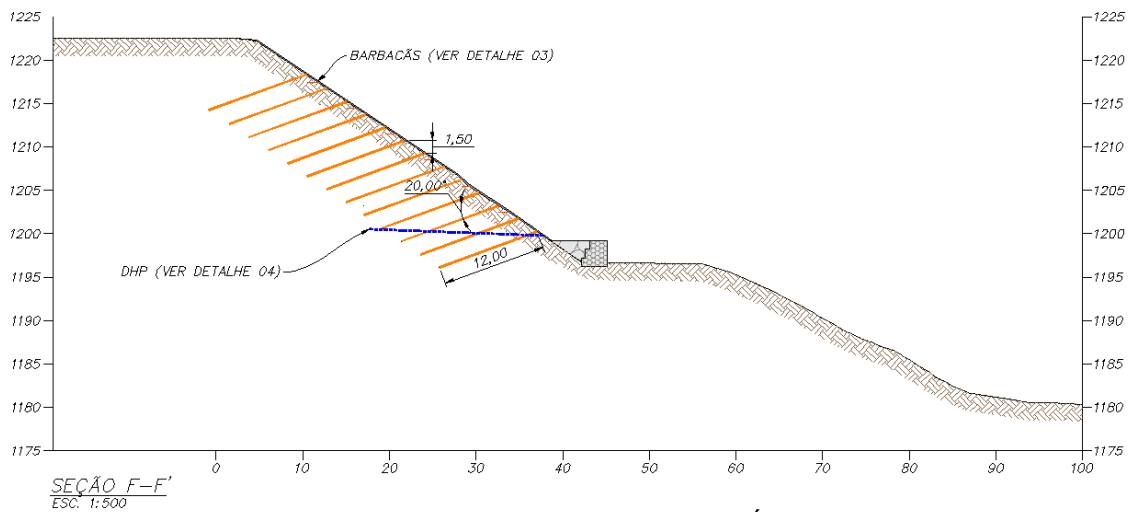


Figura 36 - Seção típica – Grampo – Área 6.

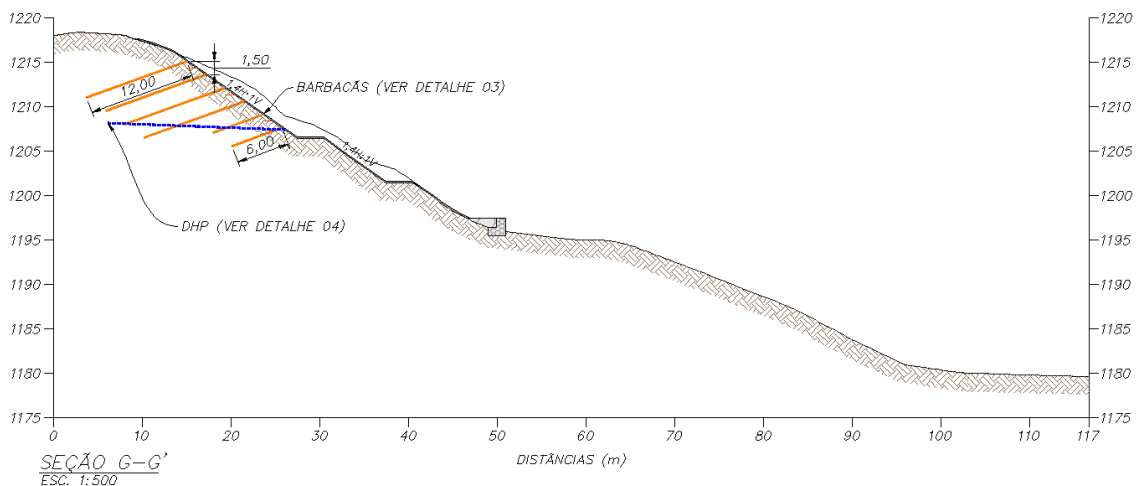


Figura 37 - Seção típica – Grampo – Área 7.

4.3.5 Proteção Superficial

Para proteção superficial da área 5 (seção E-E') foi indicado o uso de biomanta e hidrossemeadura com mix de sementes da flora regional para proteção dos taludes expostos.

A hidrossemeadura consiste na utilização de sementes que juntas aos elementos aderentes e fertilizantes são lançadas no talude, misturados com água, por meio de jateamento de alta pressão, enquanto a biomanta auxilia na retenção das sementes lançadas, evitando perdas dessas em função das precipitações pluviométricas no período inicial de aplicação.

Destaca-se que a proteção superficial com biomanta e hidrossemeadura deve ter manutenção constante até atingir cobertura total dos taludes e banquetas com vegetação.

4.4 Análise de estabilidade com a estabilização proposta

Para as análises de estabilidade na condição de projeto, foram adotados os parâmetros geotécnicos apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros geotécnicos adotados para os materiais.

MATERIAL	COR	PESO ESPECÍFICO (KN/m ³)	c' (kPa)	φ' (°)
Solo residual de Filito		18	5	28
Saprólito de Filito		20	18	30
Enrocamento		18	0	45
Gabião		20	-	-
Aterro Compactado		18	10	25
Rip-rap		18	30	30

As Figuras 38 a 41 apresentam as análises de estabilidade das seções A-A', B-B', C-C', D-D' na condição de projeto, ou seja, considerando as propostas indicadas.

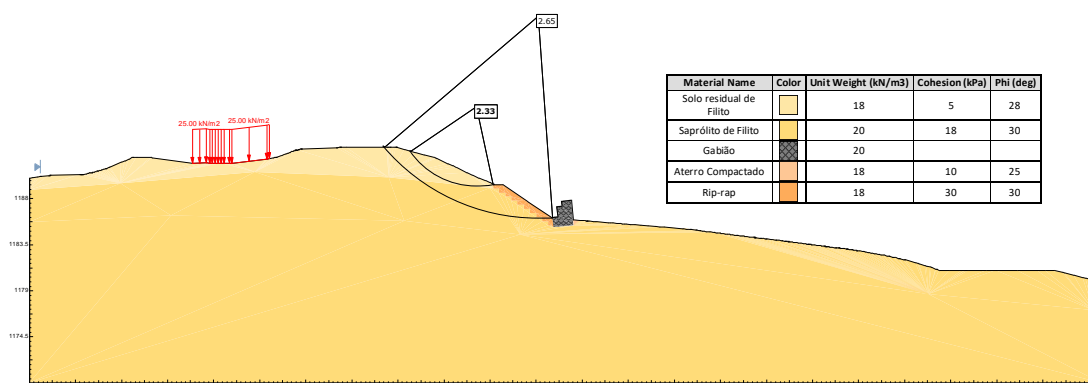


Figura 38 - Análise de estabilidade – Seção A-A' – Condição de estabilização – Cenário 2.

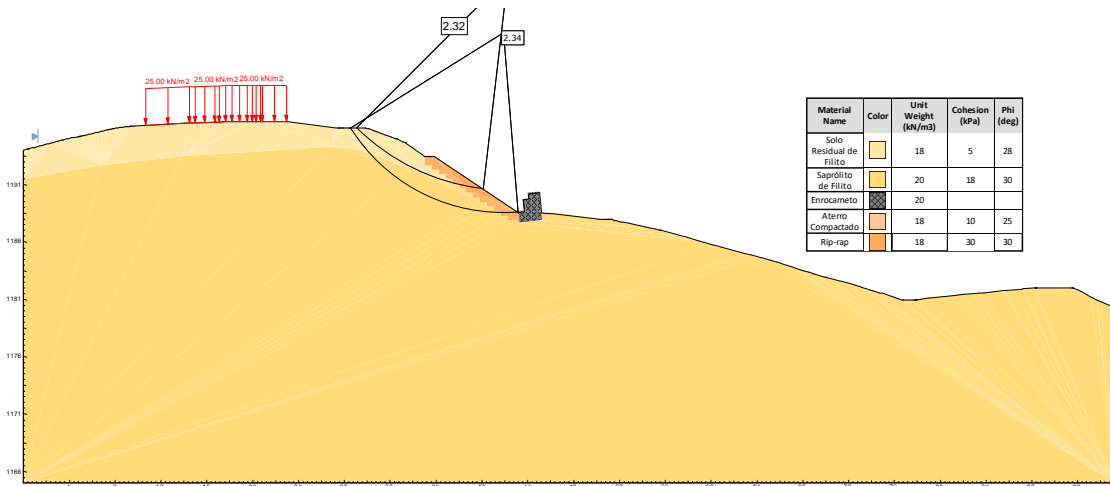


Figura 39 - Análise de estabilidade – Seção B-B' – Condição de estabilização – Cenário 2.

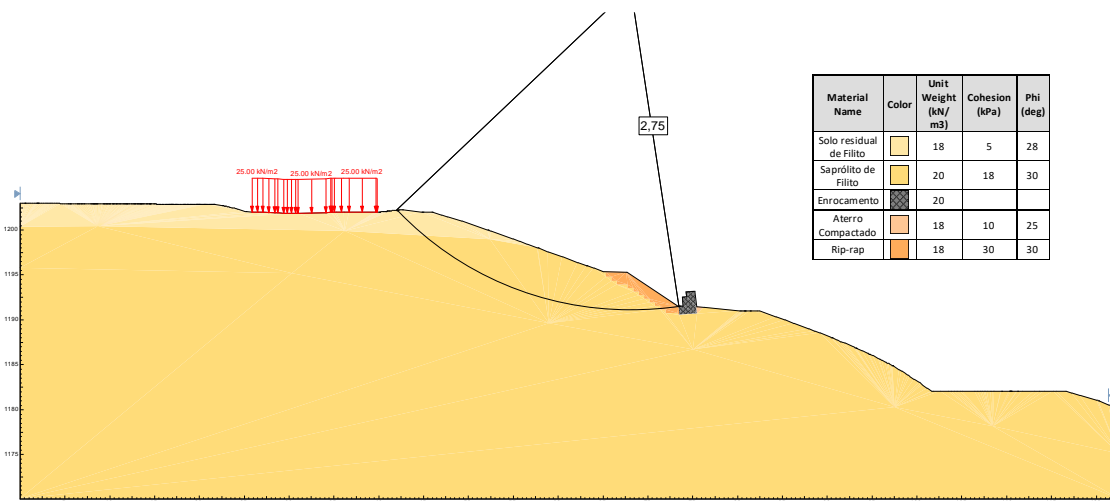


Figura 40 - Análise de estabilidade – Seção C-C' – Condição de estabilização – Cenário 2.

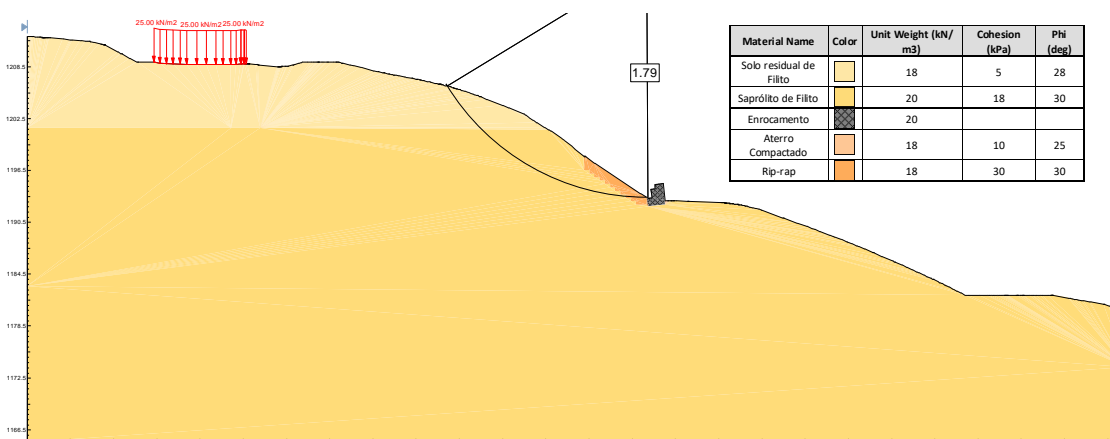


Figura 41 - Análise de estabilidade – Seção D-D' – Condição de estabilização – Cenário 2.

Para a área 5 (Seção E-E') não haverá intervenção nenhuma na geometria do talude e, portanto, não houve necessidade de testar a análise de estabilidade pós-projeto.

Na Figura 42 é apresentada a análise de estabilidade da área 6, na condição proposta, assim como as características dos grampos indicados.

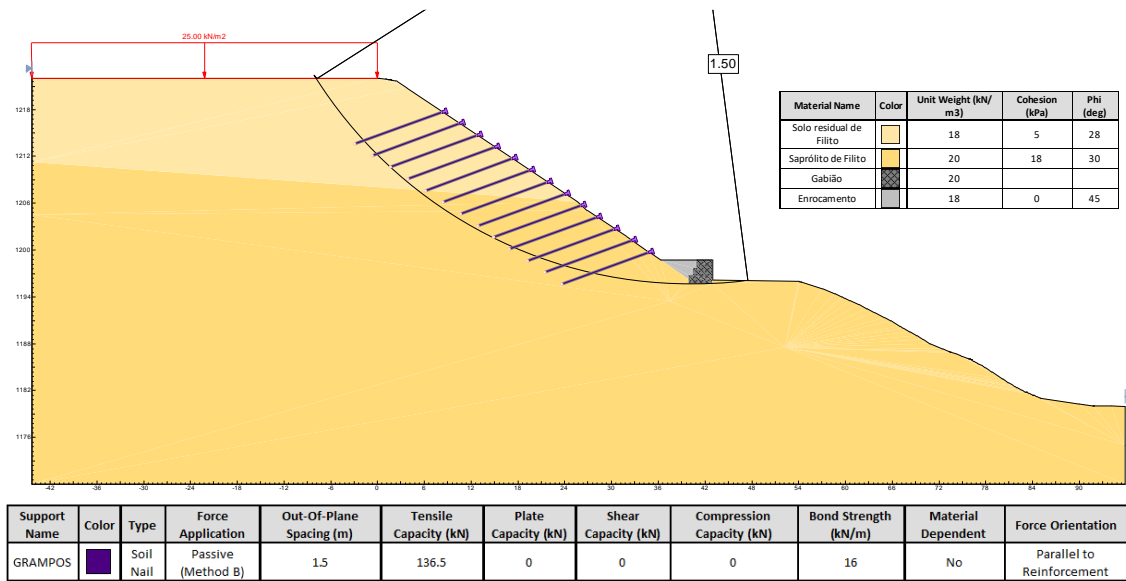


Figura 42 - Análise de estabilidade – Seção F-F’ – Condição de estabilização – Cenário 2.

Na Figura 43 é apresentada a análise de estabilidade da área 7, na condição proposta, assim como as características dos grampos indicados.

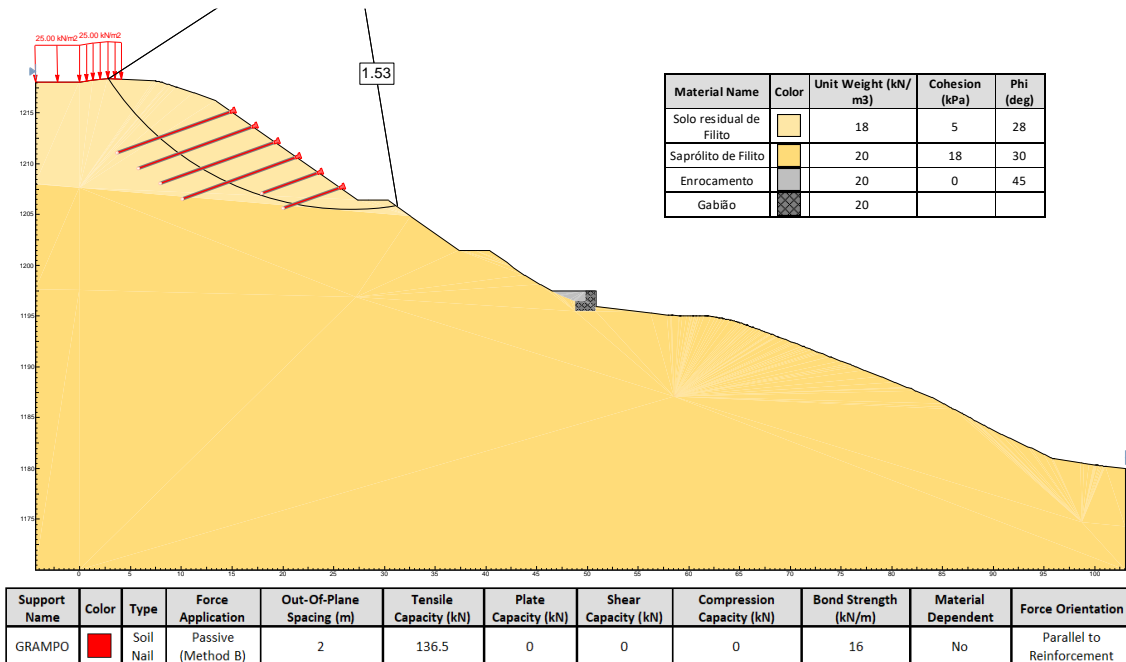


Figura 43 - Análise de estabilidade – Seção G-G’ – Condição de estabilização – Cenário 2.

Na Tabela 7 é apresentado um resumo das análises de estabilidade realizadas nas Seções A-A’, B-B’, C-C’, D-D’, E-E’, F-F’ e G-G’ na condição de projeto.

Tabela 7 - Resumo das análises de estabilidade realizadas na condição de projeto.

SEÇÃO	FS MÍNIMO ADMISSÍVEL	FS MÍNIMO OBTIDO	ATENDE
Seção A-A'	1,50	2,33	Sim
Seção B-B'	1,50	2,32	Sim
Seção C-C'	1,50	2,75	Sim
Seção D-D'	1,50	1,79	Sim
Seção F-F'	1,50	1,50	Sim
Seção G-G'	1,50	1,53	Sim

A partir da solução apresentada, os fatores de segurança atenderam às condições de estabilidade de taludes preconizadas na NBR 11.682 (ABNT, 2009).

4.5 Análise de Segurança do Muro de Gabião Existente

Na área 6 (seção F-F'), foi realizada também a análise de segurança do muro de gabião existente contra o deslizamento e o tombamento. Essa análise foi focada nessa região por ser considerada a mais crítica, demandando o maior reforço em comparação com as demais áreas.

Para essa análise foi utilizado o software GAWAC 3.0, disponível gratuitamente no site da MACCAFERRI.

O resultado da análise de segurança do muro de gabião é apresentado na Figura 44.



Figura 44 - Análise de segurança do muro de gabião existente na área 6 (seção F-F').

Observa-se, conforme apresentado na Figura 44, que o muro de gabião existente apresenta-se estável dado as solicitações global, de deslizamento e tombamento às

quais está sendo exposto, com fatores de segurança para o deslizamento de 15,42 e para o tombamento de 5,11.

5. CONCLUSÃO

Para as áreas 1, 2, 3 e 4, que apresentaram apenas escorregamentos superficiais e fatores de segurança superiores a 1,50, foram recomendadas medidas de proteção superficial em rip-rap, juntamente com a utilização de muros de gabião para contenção de sedimentos e proteção do acesso. Para a área 5, que já estava retalhada e possuía um fator de segurança superior a 1,50, foi sugerida a proteção superficial com biomanta e o plantio de grama por hidrossemeadura.

As áreas 6 e 7, que se mostraram instáveis na análise de estabilidade, foram recomendadas para receber estruturas de contenção. Para a área 6, foi proposta a execução de solo grampeado com proteção superficial em concreto projetado. Já para a área 7, foi sugerido o retalhamento, com a aplicação de solo grampeado no talude superior e proteção superficial com concreto projetado em toda a extensão.

Adicionalmente, a segurança do muro de gabião existente na área 6 contra deslizamento e tombamento foi confirmada pelo software GAWAC. Essas medidas visam garantir a estabilidade das áreas analisadas, protegendo não apenas as estruturas presentes, mas também o ambiente ao redor.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11.682**. Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro: ABNT, ago. 2009.

AUGUSTO FILHO, O. (1992). **Cartas de risco de escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilha Bela, SP**. São Paulo. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – SP, p.162.

BRADY, B. H. G., BROWN, E. T. **Rock Mechanics for Underground Mining**. Kluwer Academic Publishers: The Netherlands. 3ª edition, 2006. 628 p.

BRITO, M. M. **Geoprocessamento aplicado ao mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos no município de Porto Alegre, RS**. Dissertação MSc. UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, RS, Brasil. 2014.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia Geotécnica**. Tradução da 6 ed. americana. São Paulo: Thomson Learning, 2007. 562 p.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT S. G.; BRANDON, T. L. **Soil Strength and Slope Stability**. New York: John Wiley & Sons,.2014.

FERREIRA, J. L. F. **Análise de Estabilidade de Taludes pelos Métodos de Janbu e Spencer**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de

Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto: FEUP: 2012.

FREDLUND, D.G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M.D. (2012). **Unsaturated soil mechanics in engineering practice**. New York: John Wiley & Sons, 2012.

GALO, D. B. **Análise de riscos de barragens de rejeitos com o uso de técnicas semiprobabilísticas de estabilidade de taludes** – um estudo de caso. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental e Urbana) – Universidade Federal da Bahia, Salvador: UFBA, 2017.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 192p.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C.M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. São Paulo: Edgard Blücher, 1984, 196 p.

KRAHN, J. **The 2001 R.M. Hardy Lecture: The limits of limit equilibrium analyses**. Canadian Geotechnical Journal, vol. 40, p. 643-660, 2003.

LIMA, F. A. L.; et al. Avaliação expedita da estabilidade de taludes não saturados ao longo do tempo aplicando conceitos hidrológicos na modelagem numérica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA GEOTECNIA E DESENVOLVIMENTO URBANO – COBRANSEG, XIX, 2018. **Anais...** Salvador, Bahia: ABMS.

LISTO, F. L. R.; et al. Movimentos de massa: estado da arte, escalas de abordagem, ensaios de campo e laboratório e diferentes modelos de previsão. In: CARVALHO JUNIOR, et al. (Org.). **Revisões de Literatura da Geomorfologia Brasileira**. Brasília: Caliandra, 2022, Capítulo 20. P. 564-596. Disponível em: <https://www.livros.unb.br/index.php/portal/catalog/view/376/593/2905>. Acesso em: 01/03/2024.

MACIEL FILHO, C.L. **Introdução à Geologia de Engenharia**. Santa Maria: Editora UFSM, 1997, 289p.

MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. 2. ed. Oficina de textos, 2010.

REIS, R. **Estudo de Estabilidade de Taludes da Mina de Tapira**. 2010. 145 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, 2010. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2359>. Acesso em: 07 maio 2024.

RIFFEL, E. S.; GUASSELLI, L. A. BRESSANI, L. A. Desastres associados a movimentos de massa: uma revisão de literatura. **Boletim Goiano de Geografia. Goiânia**, v. 36, n. 2, p. 285-306, mai./jul. 2016

TERZAGUI, K. Mecanismos dos escorregamentos de terra. **Revista Politécnica da USP**, 41, 1-41. 1967.

VARGAS, M. **Geotecnia e fundações**. Oficina de Textos, 2013.

ZHU, D. Y. **Investigations on the accuracy of the simplified Bishop method**. Landslides and Engineered Slopes, Chen et al. (eds.), p. 1055-1057, Taylor & Francis Group, London, 2008.