

## Alternativas de Estabilização de Talude em Aimorés – MG

Gissele Rocha

Engenheira Geotécnica, Statum Geotecnia, Belo Horizonte, Brasil, gissele.rocha@statum.eng.br

Thiago Ferreira

Engenheiro Geotécnico, Statum Geotecnia, Belo Horizonte, Brasil, thiago.ferreira@statum.eng.br

Dorval Horta

Engenheiro Geológico, Statum Geotecnia, Belo Horizonte, Brasil, dorval.horta@statum.eng.br

Hermando Brito

Engenheiro Geotécnico, Vale S.A., Espírito Santo, Brasil, hermando.brito@vale.com

Witheney Costa

Engenheiro Geotécnico, Vale S.A., Espírito Santo, Brasil, witheney.costa@vale.com

**RESUMO:** A estabilização de taludes é uma prática essencial em projetos de infraestrutura linear, como rodovias e ferrovias, especialmente em regiões suscetíveis a processos erosivos e instabilizações geotécnicas. Este artigo apresenta os resultados do estudo de alternativas para estabilização geotécnica do talude localizado no município de Aimorés-MG. O local apresenta solos residuais de gnaiss e gnaiss sã, vinculados à Suíte Galiléia, afetados por erosões e deficiência de drenagem superficial. Foram avaliadas três soluções de engenharia: (1) retaludamento com revegetação, (2) solo grampeado com proteção superficial e (3) viga atirantada com concreto projetado. As análises atenderam à ABNT NBR 11.682/2009, sendo que todas as alternativas alcançaram fatores de segurança ( $FS \geq 1,50$ ). A alternativa 03 mostrou maior FS, mas maior custo e complexidade. O retaludamento (alternativa 01) destacou-se como solução mais viável, com menor impacto ambiental e financeiro, apresentando menor escore (14) na matriz de impacto. Ademais é previsto um sistema de drenagem superficial comum às três alternativas para assegurar o desempenho geotécnico a longo prazo. Este estudo representou uma etapa preliminar de engenharia, com soluções sujeitas a ajustes conforme os resultados de futuras investigações geotécnicas. A abordagem adotada permitiu a escolha técnica embasada e sustentável, considerando os múltiplos aspectos que envolvem obras de estabilização em infraestruturas ferroviárias críticas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estabilidade, Talude, Segurança.

**ABSTRACT:** Slope stabilization is an essential practice in linear infrastructure projects, such as highways and railways, especially in regions susceptible to erosive processes and geotechnical instabilities. This paper presents the results of a study on alternatives for geotechnical stabilization of the slope located in the municipality of Aimorés-MG. The site consists of residual gneiss soils and fresh gneiss, associated with the Galiléia Suite, affected by erosion and deficient surface drainage. Three engineering solutions were evaluated: (i) regrading with revegetation, (ii) soil nailing with surface protection, and (iii) anchored beam with shotcrete. Analyses were conducted in accordance with ABNT NBR 11.682/2009, and all alternatives achieved safety factors ( $FS \geq 1.50$ ). Alternative 03 exhibited the highest FS but also the greatest cost and complexity. Regrading (alternative 01) stood out as the most feasible solution, with lower environmental and financial impacts, achieving the lowest score (14) in the impact matrix. In addition, a surface drainage system is planned for all three alternatives to ensure long-term geotechnical performance. This study represents a preliminary stage of engineering design, with solutions subject to adjustments depending on the results of future geotechnical investigations. The adopted approach enabled a technically sound and sustainable choice, considering the multiple aspects involved in stabilization works for critical railway infrastructure.

**KEYWORDS:** Stability, Slope, Safety.

## 1 INTRODUÇÃO

Em projetos ferroviários, a estabilidade de taludes é um tema crítico, sendo amplamente abordada na literatura técnica e em normas específicas (ABNT NBR 11682, 2009; Hoek & Bray, 1981; Duncan & Wright, 2005; FRA, 2009). Taludes instáveis além de representarem riscos significativos à segurança de pessoas, à operação de empreendimentos e ao meio ambiente, podem ainda resultar em acidentes, paralisações logísticas e altos custos de reparo (Terzaghi et al., 1996; Network Rail, 2013). Por isso, estudos técnicos adequados, que considerem critérios geológicos, hidrológicos, econômicos e ambientais, são fundamentais para garantir a sustentabilidade e a eficiência de soluções de contenção e estabilização (FHWA, 2003; ABGE, 2010).

No município de Aimorés-MG, foi identificado um trecho da ferrovia em instabilidade, exigindo estudos detalhados para definição de intervenções adequadas. De acordo com o histórico do local e da inspeção realizada em campo, a área em questão foi afetada por escorregamentos, erosões e ineficiência dos dispositivos de drenagem superficial, que comprometeram a segurança e trafegabilidade da linha férrea, necessitando de levantamentos, estudos e intervenções imediatas para sua estabilização.

O presente artigo apresenta o estudo de alternativas para estabilização do talude, integrando diagnóstico geológico-geotécnico, análises de estabilidade, custos e impactos ambientais no qual são apresentadas alternativas para a sua estabilização, juntamente com a respectiva solução de drenagem superficial. Cabe destacar que todos os dados geológico-geotécnicos, nesta etapa de trabalho, basearam-se em observações de campo, na geologia regional e nos dados de investigações realizadas próximo a área de estudo.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Estudos Geológicos

A área de mapeamento foi definida no entorno do talude e apresentou ocorrência de solos de alteração e rocha sã de gnaiss pertencente à Suíte Galiléia. O mapa geológico-geotécnico elaborado para a região do talude de estudo é apresentado na Figura 1.

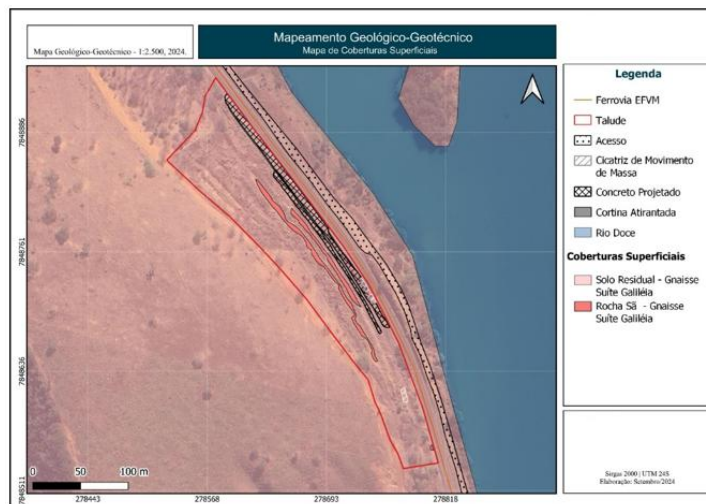


Figura 1. Mapa geológico-geotécnico de coberturas superficiais elaborado para a região do Talude Aimorés.

#### 2.1.1 Solo Residual de Gnaiss

Os produtos de alteração do gnaiss representam a ocorrência mais abundante em superfície no talude mapeado, e são associados à Suíte Nova Galiléia. Trata-se de um material silto-argiloso, localmente arenoso (areia fina) com presença de pedregulhos de quartzo, de coloração alaranjada nos locais onde é encontrado sob grau de alteração mais elevado (Figura 2).



Figura 2. Afloramentos de alteração do gnaiss, identificados durante o mapeamento geológico-geotécnico da área.

### 2.1.2 Gnaiss

Os afloramentos de gnaiss estão concentrados nas bermas superiores do talude de corte e em trechos espaçados próximos ao gabarito da linha férrea, no pé do talude, e são associados à Suíte Galiléia. Trata-se de um litotipo de coloração branco-acinzentada, com ocorrências de granada associadas ao paragneiss (Figura 3). Possui resistência moderada (R3), grau de alteração moderado a alto (W3/W4) e descontinuidades marcadas por superfícies ligeiramente rugosas. Os trechos rochosos apresentam as seguintes medidas orientativas: 352/45 no plano paralelo ao escorregamento, sentido ferrovia, e 19/38 no plano da descontinuidade, porção inferior do corte, o que condiciona as quedas de blocos.



Figura 3. Afloramentos do gnaiss, com destaque para as ocorrências de granada associadas ao paragneiss, identificados durante o mapeamento geológico-geotécnico da área.

## 2.2 Estudos Geotécnicos

O talude é formado por maciço terroso, com características granulométricas siltosas a argilosas. No entanto, em função da ausência, nesta fase de estudo, de investigações geológico-geotécnicas, algumas considerações foram necessárias para a definição dos parâmetros geotécnicos dos materiais que o compõem.

A priori, os parâmetros de resistência dos materiais, foram balizados através da literatura e de resultados obtidos em materiais semelhantes em outros estudos executados, assim como dos estudos realizados em taludes próximos, no qual apresenta materiais similares. Na Tabela 1, é apresentada a compilação dos parâmetros geotécnicos do material estimado para as análises de estabilidade da condição atual do talude, tais como peso específico natural ( $\gamma_{\text{nat}}$ ), coesão efetiva ( $c'$ ) e ângulo de atrito interno efetivo ( $\phi'$ ).

Para fase futura do estudo, foi elaborado um plano de investigações para identificar o perfil litológico do terreno, bem como os índices físicos e parâmetros de resistências dos materiais componentes do maciço em estudo.

Tabela 1. Parâmetros Considerados.

Material	$\gamma_{\text{nat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
Solo Residual de Gnaiss	18	10	28
Saprolito	20	15	29
Rocha Sã (Gnaiss)	30	80	30



## 2.3 Modelo Geológico-Geotécnico

O modelo geológico-geotécnico da seção de análise do talude foi desenvolvido considerando-se os dados obtidos no mapeamento, no diagnóstico geológico-geotécnico, na topografia, bem como na geologia regional presente na folha geológica de Conselheiro Pena e São Gabriel, desenvolvida na escala de 1:100.000, do Projeto Leste, incluso no Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (CPRM, 2000). Vale ressaltar que o modelo geológico-geotécnico preliminar contempla o afloramento de solos de alteração de gnaiss, bem como a ocorrência de rocha sã, identificada em campo em algumas porções do talude, ambos pertencentes a Suíte Galiléia.

A Figura 4 ilustra a representação em planta das seções do modelo geológico-geotécnico do Talude, enquanto a Figura 5, os perfis dos modelos desenvolvidos para avaliação da estabilidade do talude, cujas análises são apresentadas nos itens consequentes. Ressalta-se que para escolha da seção crítica, foi levado em consideração a inclinação e altura do talude. Salienta-se que foram consideradas duas seções de estudo, a fim de realizar uma setorização no tratamento proposto, uma vez que em trechos do talude existem contenções ativas.



Figura 4. Representação, em planta, das seções de análise do Talude.

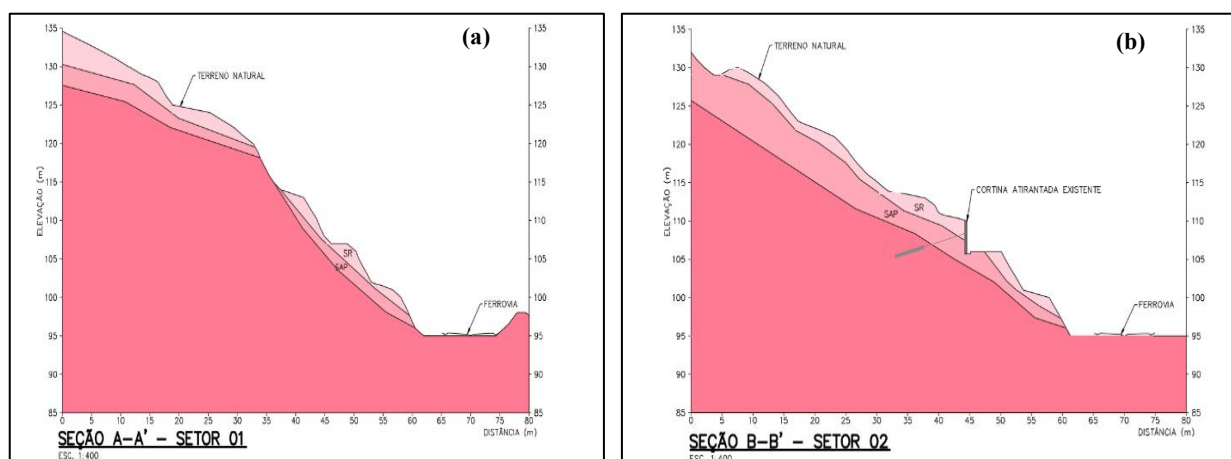


Figura 5. Perfil geológico-geotécnico do Talude – Seção A-A' (a) e Seção B-B' (b).

## 3 ALTERNATIVAS PROPOSTAS

O talude em estudo se trata de um talude de corte subverticalizado, com altura total de, aproximadamente, 30,00 m, com presença de cobertura vegetal e existência de estrutura ferroviária a jusante.

As análises de estabilidade foram desenvolvidas considerando-se os critérios discriminados na norma ABNT NBR 11.682/2009, que apresenta as diretrizes para a estabilidade de encostas. Foram considerados os

níveis de segurança alto, referente a perda de vidas humanas, e médio, referente a danos materiais e ambientais, uma vez que a instabilização do talude pode inviabilizar a operação da ferrovia por um período. Portanto, definiu-se, como valor de fator de segurança (FS) mínimo admissível para o talude, 1,50. Em função das características dos solos identificados na região do talude, as análises de estabilidade foram conduzidas admitindo-se análises não circulares.

Para a condição atual do talude, como não foi identificado surgência na base, o NA foi inferido em maior profundidade. Realizou-se a análise de sensibilidade do nível d'água e verificou-se que ele não influencia nos resultados das análises. Atualmente se encontra com  $FS = 1,28$  e  $FS = 1,36$ , para os setores 01 e 02 respectivamente.

### 3.1 Alternativa 01 - Retaludamento

Para esta alternativa é proposto um retaludamento em toda face do talude e revegetação. Para execução do retaludamento o trecho foi dividido em dois setores, sendo o primeiro referente a área onde não possui intervenções de obras de engenharia e o segundo setor relacionado a porção com existência de contenções. Para esta proposta é previsto a manutenção dos bancos existentes, realizando apenas abatimento das áreas, sendo considerado para o setor 01, uma inclinação de  $45^\circ$  e bermas de 2 metros nos três primeiros bancos e de aproximadamente 7 metros no último banco. Para o setor denominado como setor 02 (porção com contenção ativa), foi avaliado inclinações de  $34^\circ$  a  $45^\circ$  e bermas de 2 metros a 3,5 metros. Para trechos de maior inclinação com afloramento rochoso, indica-se quando necessário a instalação de grampos, de maneira pontual, a fim de garantir a estabilidade do local (Figura 6).

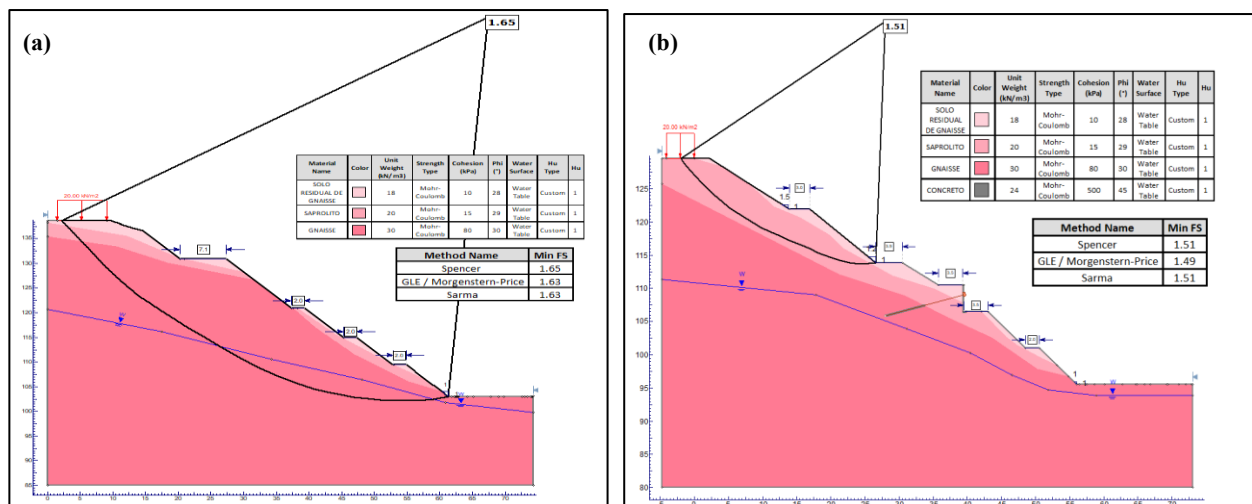


Figura 6. Retaludamento – Setor 01 (a) e Setor 02 (b) – Ruptura não circular.

### 3.2 Alternativa 02 – Solo Grampeado e Drape

A solução de engenharia proposta como Alternativa 02 consiste na execução de linhas de grampo (solo/rocha grampeado), de maneira a garantir a estabilidade do maciço. O solo grampeado é uma técnica passiva de reforço do terreno natural ou escavado que consiste, basicamente, na intrusão do grampo no terreno, sendo a estabilidade assegurada pelas forças de atrito que se desenvolvem na interface solo-grampo. Os grampos, por serem elementos passivos, só são mobilizados quando ocorre deformação da massa de solo reforçada.

Para a execução da estabilização, foi considerada para o primeiro setor a instalação de 12 linhas, com comprimento de 6,00 m, inclinação de  $15^\circ$  em relação à horizontal, no qual foram distribuídos em malha de 2,50 m na vertical por 2,00 m na horizontal (malha de 2,50 x 2,00 m), já para o segundo setor, uma inclinação de  $15^\circ$  em relação à horizontal, malha de 2,00 m na vertical por 2,00 m na horizontal (malha de 2,00 x 2,00 m), sendo 7 linhas na porção superior com comprimentos de 9,00 m e na porção inferior 6 linhas com comprimentos de 6,00 m. Além disso, as análises foram desenvolvidas adotando-se barras de aço GEWI 32 mm (ou similar), instaladas em furos com diâmetro de 100 mm (Figura 7). Ademais, como

proteção de face do talude, sugere-se a implantação de geocomposto formado por geomanta e tela metálica ou a execução de concreto projetado, a fim de se evitar carreamento de solo, conter processos erosivos existentes e prevenir contra o desencadeamento de novos processos instabilizantes.

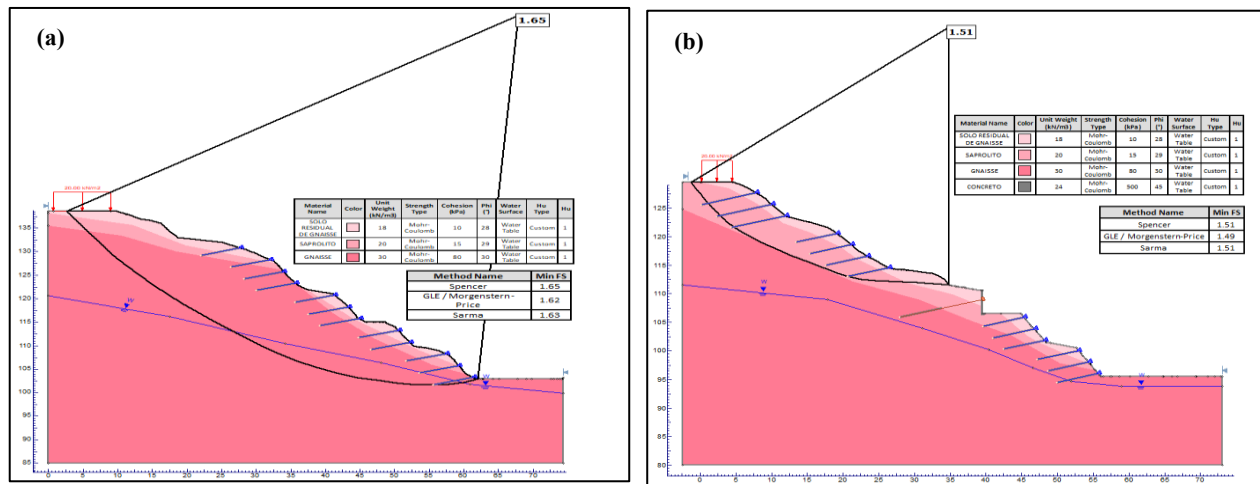


Figura 7. Solo Grampeado – Setor 01 (a) e Setor 02 (b) – Ruptura não circular.

### 3.3 Alternativa 03 – Viga Atirantada

A Alternativa 03 consiste na execução de linhas de tirantes em toda face do talude, sendo executado como vigas, de forma a garantir a estabilidade global. A viga atirantada é uma técnica ativa de estabilização de maciços terrosos e rochosos que consiste, basicamente, na intrusão do tirante e a sua protensão no maciço, sendo o elemento intrusivo dividido em dois trechos: o livre e o ancorado em uma zona resistente (bulbo de tensão). Nesta técnica, a estabilidade é assegurada pelas vigas/cortina, que devem ter espessura suficiente para se evitar a ruptura ou deformação excessiva do talude, bem como danos na estrutura armada. Além disso, deve ser garantido que não ocorra o puncionamento dos tirantes.

Para a execução da estabilização, foi definido tratamento composto por 6 linhas de tirantes para o setor 01, e 07 linhas de tirantes correspondente ao setor 02, distribuídos em uma malha de 3,00 m na vertical e 2,0 m na horizontal e 2,50m na vertical e 2,00m na horizontal, respectivamente. Em ambos os setores a inclinação é de 15° em relação a horizontal, possuindo um trecho ancorado de 50%. Foi considerado o uso de tirantes de aço DYWIDAG de 32 mm (ou similar), instalados em furos de 100 mm de diâmetro (Figura 8).

Para o paramento de proteção entre as vigas, sugere-se a implantação de concreto projetado ou tela metálica, para se evitar carreamento de solo, conter processos erosivos existentes e prevenir contra o desencadeamento de novos processos instabilizante.

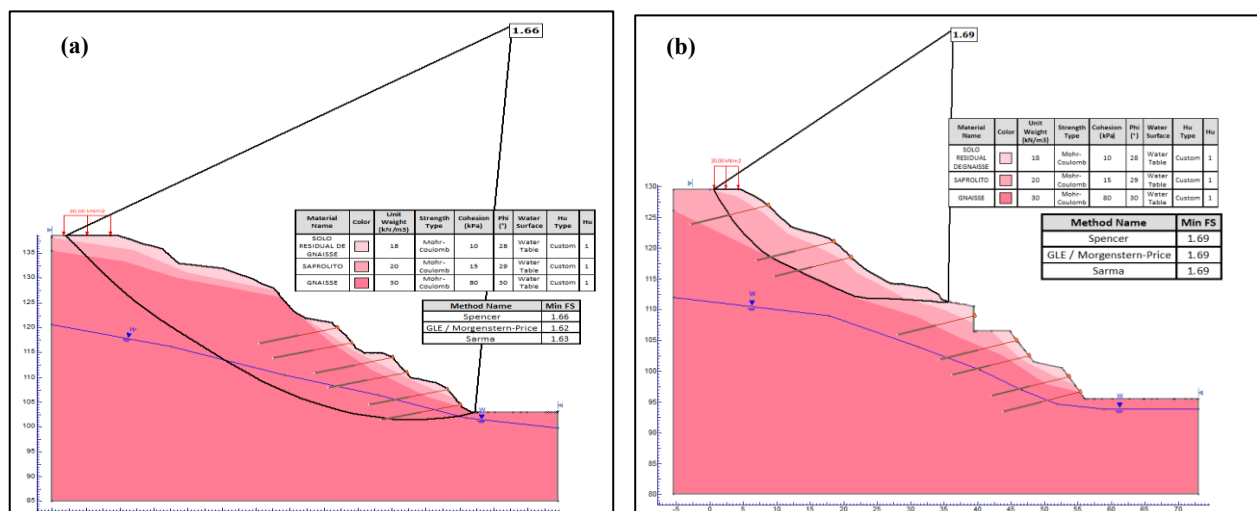


Figura 8. Viga atirantada – Setor 01 (a) e Setor 02 (b) – Ruptura não circular.

### 3.4 Matriz de Impacto

Segundo a NBR 11.682 (ABNT, 2009), a escolha da solução a ser adotada no projeto de estabilização deve levar em conta a caracterização do mecanismo de instabilização, a elaboração de modelo geológico-geotécnico das condições locais e um estudo de alternativas de projeto em que sejam considerados: acessos, condições de operação de equipamento, disponibilidade de materiais, local adequado para bota-fora; dificuldades construtivas, interferências com instalações existentes, implicações ambientais, dificuldades de manutenção, segurança da equipe e dos equipamentos envolvidos na construção, além dos custos e prazos do empreendimento.

Para tal, foi elaborado a Matriz de Impacto da Obra, a fim de elencar as soluções apresentadas em cada trecho. Devido a tal indicação, os níveis de impactos foram definidos a partir dos seguintes aspectos semiquantitativos: a) Tempo de obra; b) Impacto ambiental, devendo considerar emissões de carbono; c) Impacto nas comunidades locais, ou pelos caminhos de acesso, com pessoas, equipamentos e materiais; d) Financeiro; e) Risco relacionados a Saúde & Segurança e f) Técnica adotada.

Os impactos foram mensurados de maneira quantitativa, no qual cada critério possui um peso relativo a cada uma das três soluções apresentadas para o talude em estudo. Conforme a metodologia, o impacto de cada solução é dado pela somatória dos pesos de cada um dos níveis de impacto. Quanto maior o impacto maior a nota do nível do impacto. Considerando que todas as classes de impacto possuem o mesmo peso, o menor resultado da soma das notas desses impactos, relativas as opções A, B e C será eleita a 1ª colocada.

Para o trecho do Talude Aimorés, foram apresentadas as seguintes soluções avaliadas pela Matriz de Impacto: (i) Solução A: Retaludamento; (ii) Solução B: Solo Grampeado; e (iii) Solução C: Viga Atirantada. Para a quantificação apresentada na matriz foi considerada a classificação crescente para os valores de 1 a 5, portanto, o valor um (1) representa o menor nível de impacto identificado e o valor cinco (5) o maior nível. A Figura 9 apresenta a classificação obtida para o Talude Aimorés.

NÍVEL DO IMPACTO	1	2	3	4	5
IMPACTO TEMPO			A	B	C
IMPACTO AMBIENTAL			A	B	C
IMPACTO COMUNIDADES	A				
	B				
	C				
IMPACTO FINANCEIRO			A	B	C
IMPACTO SAÚDE & SEGURANÇA		A		B	C
IMPACTO TÉCNICO		A	B	C	

Figura 9. Matriz de Impacto das 3 soluções do talude.

A Tabela 2 apresenta a somatória dos níveis de impactos de cada uma das soluções, no qual o menor valor da somatória indica o menor impacto. A solução A (Alternativa 01 - Retaludamento) por possuir nível com valor de 14, é considerada a solução com menor impacto.

Soluções	Nível de Impacto Total
A	14
B	20
C	23



## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base em mapeamento geológico-geotécnico, inspeções de campo e dados secundários, foram propostas três soluções de engenharia: (1) retaludamento com revegetação, (2) solo grampeado com proteção superficial, e (3) viga atirantada com concreto projetado. Cada alternativa foi analisada em termos de estabilidade, viabilidade técnica, impacto ambiental, custo e segurança operacional, utilizando como base os critérios da norma ABNT NBR 11.682/2009. Foi realizada também a análise de sensibilidade devido à incerteza do nível d'água (N.A.) e verificou-se que o N.A. não é fator predominante neste estudo.

As análises de estabilidade indicaram que todas as alternativas apresentaram fator de segurança superior ao mínimo exigido ( $FS \geq 1,50$ ). A Alternativa 03 (viga atirantada) apresentou os maiores fatores de segurança, porém com maior custo e complexidade construtiva. A Alternativa 01 (retaludamento) se destacou por sua execução mais simples, menor impacto ambiental e financeiro, sendo considerada a solução com menor impacto segundo a matriz de impacto desenvolvida para o estudo.

A matriz de impacto avaliou seis critérios: tempo de obra, impacto ambiental, impacto nas comunidades, custo, saúde e segurança, e complexidade técnica. A Alternativa 01 obteve o menor escore de impacto (14), seguida pelas alternativas 02 (20) e 03 (23), sendo indicada como a mais vantajosa no contexto atual do estudo. Adicionalmente, foi previsto um sistema de drenagem superficial comum às três alternativas, composto por canaletas e descidas d'água em degraus, para assegurar o desempenho geotécnico a longo prazo.

Este estudo representou uma etapa preliminar de engenharia, com soluções sujeitas a ajustes conforme os resultados de futuras investigações geotécnicas. A abordagem adotada, apesar das simplificações consideradas nas análises realizadas e as limitações dos resultados, permitiu a escolha técnica embasada e sustentável, considerando os múltiplos aspectos que envolvem obras de estabilização em infraestruturas ferroviárias críticas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (2010). *Cartilha de Estabilidade de Encostas*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.
- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). (2000). *Programa de levantamentos geológicos básicos do Brasil – PLGB*. Brasília: CPRM.
- Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). *Soil Strength and Slope Stability*. John Wiley & Sons, p.228.
- Federal Railroad Administration (FRA). (2009). *Track Design Handbook for High-Speed Rail*. Washington, DC.
- Federal Highway Administration (FHWA). (2003). *Soil Slope and Embankment Design*. Publication No. FHWA-NHI-05-123.
- Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). *Rock Slope Engineering*. Institution of Mining and Metallurgy.
- Network Rail (UK). (2013). *Earthworks Technical Specification NR/L2/CIV/086*.
- Terzaghi, K., Peck, R.B. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd ed., McGraw Hill, New York, NY, USA, 685 p.