

Desempenho de Contenção Composta pela Associação entre Trilhos Ferroviários Cravados e Cortina Atirantada

José Allan Carvalho Maia

Engenheiro Geotécnico, Vale S.A, Belo Horizonte, Brasil, allan.maia@vale.com

Gustavo Vinicius Gouveia

Geólogo Geotécnico, Vale S.A, Belo Horizonte, Brasil, gustavo.gouveia@vale.com

Ana Paula de Campos Daher

Geóloga Geotécnica, Vale S.A, Belo Horizonte, Brasil, c0662845@vale.com

Marcus Vinicius Dilascio

Geólogo Geotécnico, Vale S.A, Belo Horizonte, Brasil, marcus.dilascio@vale.com

RESUMO: O presente artigo busca compartilhar o estudo desenvolvido para a implantação de uma cortina atirantada, cujo objetivo foi salvaguardar uma importante linha ferroviária impactada pelo intenso período chuvoso de 2021/2022. Em razão das particularidades operacionais da linha férrea de via dupla, a estrutura de contenção necessitava que sua implantação se desse em curto tempo. Tal premissa conduziu ao emprego de técnica não trivial para a grande maioria das obras geotécnicas de contenção, mas bastante usual e prática para as obras geotécnicas de contenção aplicadas a infraestrutura ferroviária. Basicamente a técnica utilizou a associação entre trilhos ferroviários cravados e muro de concreto armado atirantado. Esta tratativa contribuiu para o reforço do terreno e garantiu a manutenção da operação das linhas férreas, sob limitação da velocidade de trânsito das composições ferroviárias e, acompanhamento geotécnico diário da área da obra. Ao final, o artigo dividirá com a comunidade técnica a impressão dos autores quanto ao uso de códigos computacionais 2D na simulação numérica de obras similares.

PALAVRAS-CHAVE: Estrutura de Contenção, Modelagem Numérica, Estabilidade de Talude, Ferrovia.

ABSTRACT: This article delivers the study developed for implementing an anchored retaining wall to safeguard an important railway line impacted by the intense rainy season of 2021/2022. Due to the operational particularities of the double-track railway line, the retaining wall required its implementation to take place in a brief time. This premise led to the use of a non-trivial technique for the vast majority of retaining wall works, but it is quite common and practical for geotechnical railway infrastructure. The technique used the association between nailed railway tracks and an anchored retaining wall. This approach contributed to strengthening the land and guaranteed the maintenance of the operation of the railway lines, subject to the limitation of the traffic speed of the railway trains and daily geotechnical monitoring of the work area. In the end, the article will share with the technical community the authors' impression regarding the use of 2D computational codes in the numerical simulation of similar works.

KEYWORDS: Retaining Wall, Numerical Modelling, Slope Stability, Railway.

1 INTRODUÇÃO

A Estrada de Ferro Carajás (EFC) faz a ligação dos Complexos Mineradores de Serra Norte e Serra Sul (no Pará) ao porto marítimo da Madeira (no Maranhão). Em razão do volume diário de composições ferroviárias, a EFC é estruturada em duas linhas tronco principais que possibilita o trânsito simultâneo de trens em ambas as direções, ou seja, do porto à mina e vice-versa.

O presente trabalho apresenta a reavaliação da estabilidade do km 378 após a cravação de trilhos ferroviários (Figura 1), estes associados uma típica cortina atirantada conformada por dez painéis (Painel 1 ao

Painel 10) e com duas linhas de tirantes. Esta solução de engenharia foi empregada na estabilização da plataforma ferroviária localizada no quilometro mencionado, onde ela apresentou elevadas deformações após intenso período chuvoso no ano de 2022.

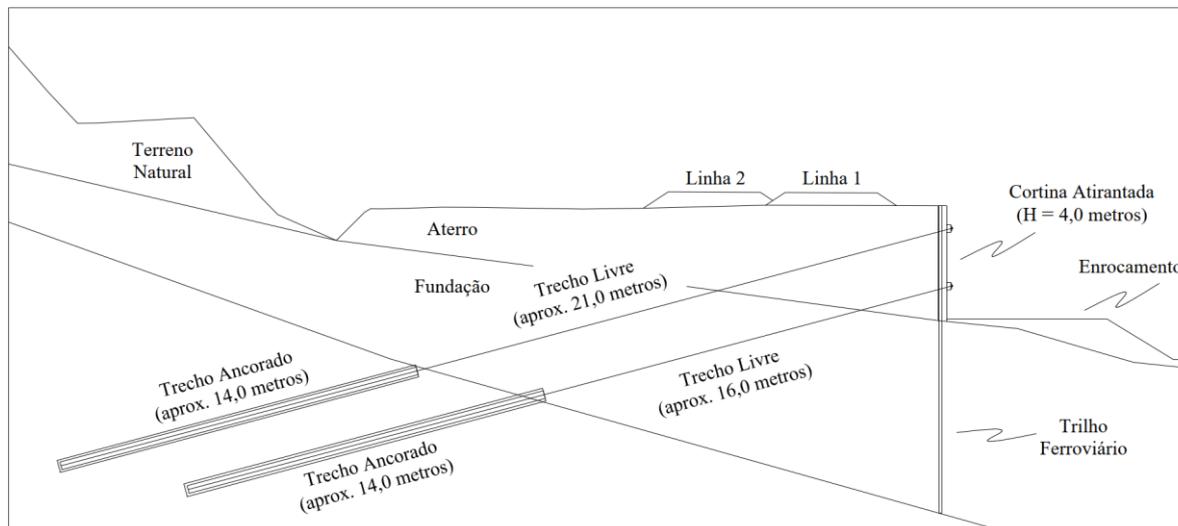


Figura 1. Seção transversal esquemática do km 378 da Estrada de Ferro Carajás.

1.1 Critérios de Análise

Após a compilação dos dados existentes, um conjunto de critérios de análise foi estabelecido de forma a preservar o conhecimento produzido para o projeto detalhado da cortina. Em suma, os critérios de análise considerados foram os seguintes:

- Parâmetros geotécnicos obtidos do projeto detalhado;
- Nível freático localizado no contato entre o material de fundação e o aterro da ferrovia;
- Ação sísmica igual a 0,01 g compatível com a Intensidade III da escala de Mercalli Modificada (Lopes & Nunes, 2011), este valor representa a vibração devido a circulação das composições;
- Carregamentos operacionais da EFC:
 - Linha Tronco 1 adjacente a cortina atirantada:
 - 67 kPa (trem carregado a velocidade de 30 km/h);
 - 40 kPa (agrupamento dos vagões vazios e das locomotivas a velocidade de 30 km/h);
 - 83 kPa (trem carregado a velocidade de 80 km/h);
 - Linha Tronco 2 distante da cortina:
 - 73 kPa (trem carregado a velocidade de 50 km/h);
 - 83 kPa (trem carregado a velocidade de 80 km/h).
- Trilhos da cravados do tipo TR68;
- Espaçamento (aprox. de 1,5 metros) e comprimento variável (6,0 a 9,0 metros) para os trilhos cravados segundo o indicado no cadastramento locacional de cravação dos trilhos ferroviários;
- Posição, inclinação e comprimento (livre e ancorado) dos tirantes conforme projeto detalhado.

De forma a respeitar a tolerância aos riscos estabelecidos pelo operador da EFC, o presente trabalho empregou como critério de aceitação para o fator de segurança (FoS) o valor mínimo de 1,5. Este valor visa concomitantemente garantir os níveis de segurança contra danos a vidas humanas, ao meio ambiente e eventuais perdas materiais. Ademais, o citado valor mínimo também é recomendado por documentos técnicos com os padrões da indústria, tais como:

- ABNT NBR 11682 (2ª Edição, 21/08/2009): Estabilidade de Encostas (ABNT, 2009);
- ABNT NBR 16920-1 (1ª Edição, 19/01/2021): Muros e Taludes em Solos Reforçados – Parte 1: Solos Reforçados em Aterros (ABNT, 2021).

1.2 Parâmetros Geotécnicos e dos Materiais

Os parâmetros geotécnicos (Tabela 1) foram obtidos do projeto detalhado como citado anteriormente. De acordo com a documentação do projeto detalhado, os parâmetros foram adotados pela equipe técnica responsável levando em consideração as observações coletadas durante diversas inspeções de campo, resultados de seis sondagens percussivas e, da própria experiência da equipe técnica envolvida em trabalhos anteriores na região. No tocante aos parâmetros dos elementos da cortina atirantada (Tabela 2), esses foram definidos a partir das informações disponibilizados no projeto detalhado e por meio de seus fabricantes, mediante pesquisa bibliográfica da literatura técnica especializada.

Tabela 1. Parâmetros usados na reavaliação de estabilidade do km 378 da Estrada de Ferro Carajás.

Material	Critério de Ruptura	γ_{seco} (kN/m ³)	γ_{sat} ^a (kN/m ³)	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito
Arenito <i>In Situ</i>		18		40 ^a	35°		
Argila Aluvião ^a		20		0	33°		
Aterro	Mohr-Coulomb	18	22	7	27°	0	27°
Lastro ^a		25		1	45°		
Sedimentos ^a		14		0	22°		
Silte Arenoso-Argiloso		18		0	33°		
Silte Arenoso		18	20	5	33°	0	33°
Silte Argiloso		14	16	5 ^a	22°	0	22°
Solo Mole		14		0	22°		

^a Valor adotado.

Tabela 2. Parâmetros adotados para os elementos da cortina atirantada.

Parâmetro	Tirante	Trilho Ferroviário Cravado TR68
Diâmetro (mm)	36,0	-
Área da Seção Transversal (mm ² , aprox.)	1.018,0	8.652,0
Resistência a Tração (kN)	200,0	-
Resistência de Aderência (kN/m/m)	20,8	-
Resistência ao Cisalhamento (kN, aprox.)	-	1.200
Comprimento Ancorado (m)	14,0	-
Comprimento Livre da 1ª Linha (m)	21,0	-
Comprimento Livre da 2ª Linha (m)	16,0	-
Resistência da Placa (kN)	100,0	-

2 MODELO GEOLÓGICO

O modelo geológico base para as análises foi construído a partir dos dados de sondagens históricas, levantamento topográfico de 2022 e, investigações geofísicas de superfície. Embora a fundação do aterro da ferrovia tenha sido interceptada pelas sondagens, a região de estudo é muito ampla, e a densidade de sondagens muito pequena. Neste sentido, os contatos foram interpretados a partir da reunião dos resultados das três linhas de eletrorresistividade e dos boletins de sondagens. Por fim, o modelo geológico elaborado alcançou representar os principais elementos componentes do substrato, materiais aflorantes, sedimentos fluviais e os próprios elementos do aterro da ferrovia (Figura 2).

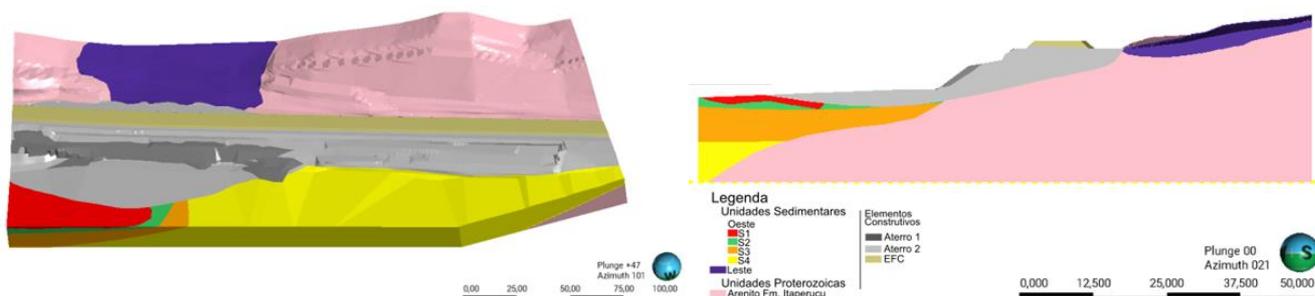


Figura 2. Modelo geológico da Estrada de Ferro Carajás.

3 ANÁLISE E RESULTADOS

O programa Slide3 v. 3.0 (Rocscience, 2023) foi empregado para melhor capturar o comportamento espacial da obra em tela. Este *software* emprega os conceitos do método de equilíbrio limite em um ambiente tridimensional, o qual confronta as forças resistentes (estabilizadoras) e forças mobilizantes (instabilizadores), de maneira a investigar o desbalanceamento das forças cisalhantes ao longo da superfície crítica de escorregamento. Além disso, as análises utilizaram o método de cálculo de Morgenstern-Price em virtude de seu rigor matemático, assim como a técnica de busca da superfície de escorregamento conhecida por *Particle Swarm Search (multiple failures)*, em razão do seu avançado algoritmo computacional de varredura das superfícies com maior desbalanceamento das forças cisalhantes. O *Particle Swarm Search* (Kalatehjari *et al.* 2014, Kennedy & Eberhart, 1995) ainda possibilitou o cálculo de até seis superfícies críticas para cada nova corrida computacional do Slide3.

3.1 Considerações Iniciais

Inicialmente, cabe esclarecer que a análise pelo método de equilíbrio limite não é capaz de simular as várias etapas construtivas de um projeto de maneira associada (passo a passo). Neste sentido, quando se faz necessário o melhor entendimento da influência recíproca entre as várias etapas construtivas, o método de elementos finitos baseado nos princípios de tensão-deformação é fortemente indicado. Este último é capaz de investigar os efeitos positivos e negativos da redistribuição das tensões decorrentes das diversas etapas construtivas, tais como escavação, aplicação da camada inicial de concreto projetado, construção da parede em concreto armado, instalação dos tirantes, ganho progressivo de resistência da resina/*grout* dos tirantes, etc.

Por fim, a decisão pelo uso do Slide3 foi tomada devido que uma análise tensão-deformação iria atribuir incertezas na reavaliação da estabilidade do km 378. Isto devido a necessidade de se adotar valores para os parâmetros de rigidez (módulo de deformabilidade e índice de Poisson) dos materiais do aterro e da fundação, pois não existem ensaios laboratoriais do tipo triaxial para o km 378. Além disso, a análise tensão-deformação precisa de um melhor entendimento sobre o comportamento dos materiais frente ao estado de tensões, em outros termos, sob certo estado de tensões (naturais ou induzidas) os materiais tendem a um comportamento frágil (perda rápida de resistência) ou dúctil (perda lenta de resistência).

3.2 Modelo Numérico 3D

A construção do modelo numérico 3D (Figura 3) apoiou-se no modelo geológico, em informações coletadas em inspeções geotécnicas de campo e, no cadastro locacional de cravação dos trilhos ferroviários (inclusive comprimentos particulares). No tocante aos tirantes, os seus respectivos comprimentos e ângulos de instalação foram baseados nos detalhes apresentados no projeto detalhado. Em síntese, o modelo numérico foi otimizado no *software* Slide3 por meio de união das informações disponíveis.

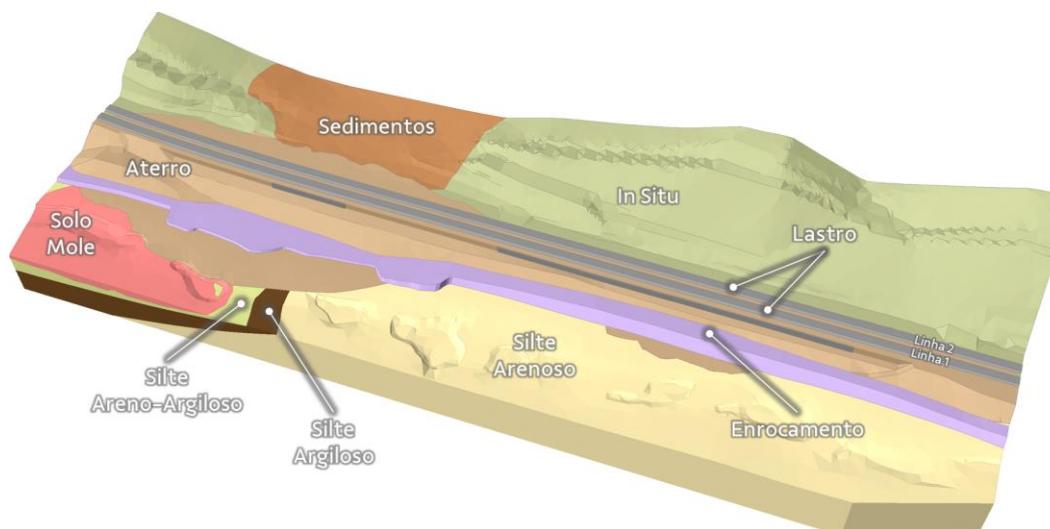


Figura 3. Modelo numérico tridimensional utilizado na reavaliação da estabilidade do km 378.

3.3 Cenários Abordados

Em linhas gerais, a presente reavaliação não buscou investigar os FoS intermediários associados as fases construtivas, mas somente na condição após a conclusão da primeira linha de tirantes (Cenário 1) e após a conclusão das obras (Cenário 2). A Figura 3 exibe os cenários considerados na reavaliação da estabilidade do km 378.

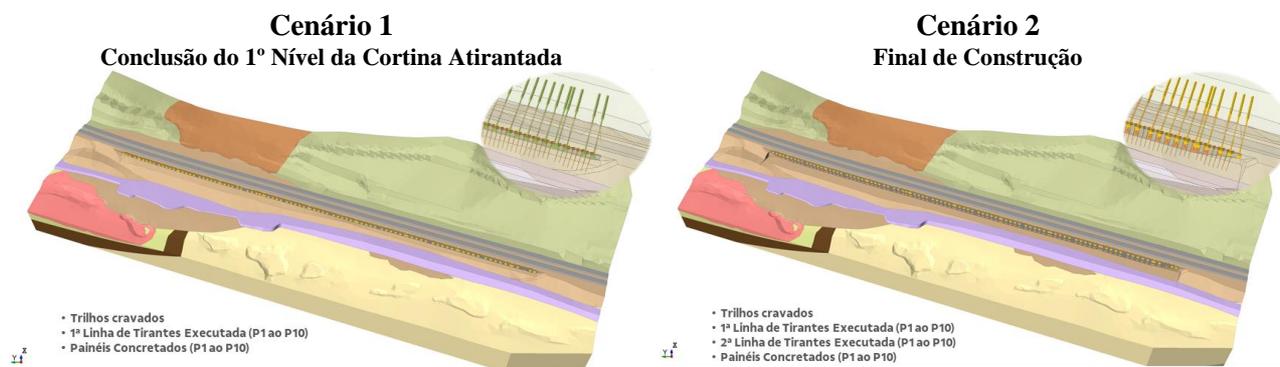


Figura 3. Cenários da reavaliação da estabilidade do km 378 da Estrada de Ferro Carajás.

3.4 Análise do Cenário 1 – Conclusão do 1º Nível da Cortina Atirantada

O modelo numérico do Cenário 1 investigou o desempenho da obra de contenção após a completa execução de sua primeira linha de tirantes (100% da carga), porém com a construção parcial do paramento de concreto armado ($\frac{1}{2}H$) associado aos trilhos cravados (Figura 4). Para tanto, o estudo considerou quatro combinações operacionais das linhas troncos ferroviárias, sendo estas:

- Com Restrição na Circulação:
 - Combinação 1
 - Linha 1 – 67 kPa – Trem carregado a velocidade de 30 km/h;
 - Linha 2 – 73 kPa – Trem carregado a velocidade de 50 km/h.
 - Combinação 2
 - Linha 1 – 67 kPa – Trem carregado a velocidade de 30 km/h;
 - Linha 2 – 83 kPa – Trem carregado a velocidade de 80 km/h (velocidade operacional máxima).
 - Combinação 3
 - Linha 1 – 40 kPa – Trem vazio (locomotiva + vagões) a velocidade de 30 km/h;

- Linha 2 – 83 kPa – Trem carregado a velocidade de 80 km/h.
- Sem Restrição na Circulação:
 - Linha 1 – 83 kPa – Trem carregado a velocidade de 80 km/h;
 - Linha 2 – 83 kPa – Trem carregado a velocidade de 80 km/h.

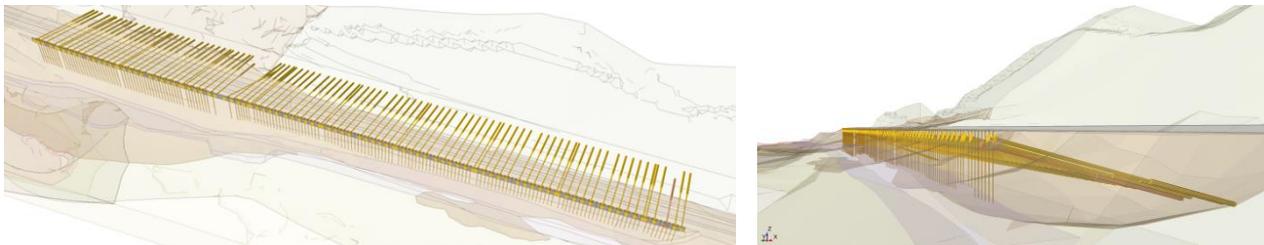


Figura 4. Modelo numérico utilizado no Cenário 1.

Os resultados indicam que a presença dos tirantes, conjuntamente com os trilhos ferroviários cravados e muro de concreto armado, conduz a ganhos na condição de segurança do aterro da EFC (Figura 5). Em ambas as combinações, os FoS calculados ao nível da plataforma ferroviária respeitam o preconizado nos critérios descritos no Item 1.1 ($FoS \geq 1,5$). Não obstante, na plataforma do acesso construtivo materializada em encoramento (Figura 1) se percebe pontualmente FoS inferiores a 1,4.

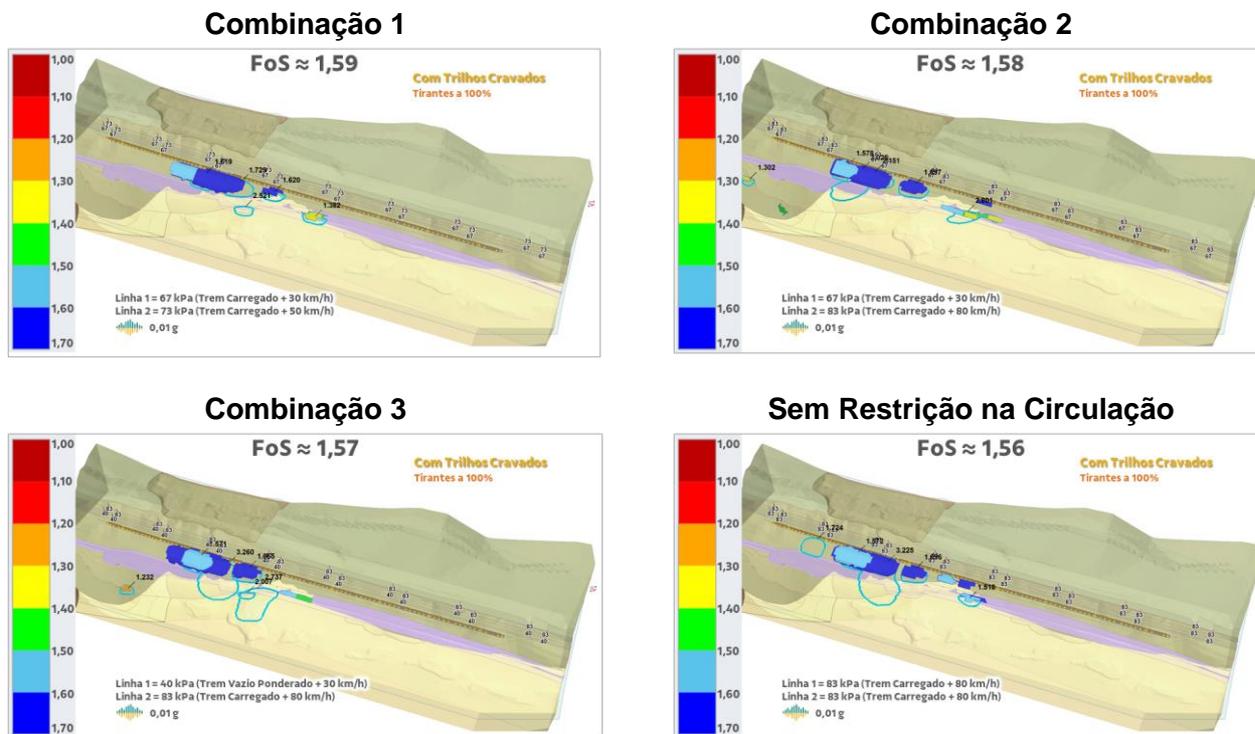


Figura 5. – FoS calculados para o Cenário 1.

3.5 Análise do Cenário 2 – Final de Construção

O modelo numérico do Cenário 2 buscou examinar o arranjo final após conclusão das obras e com a cortina atirantada sujeito a circulação ferroviária da EFC, sem restrições quanto a velocidade das composições ferroviárias e/ou limitações no transporte de cargas. A Figura 6 mostra o arranjo dos trilhos ferroviários cravados, tirantes da primeira e segunda linhas e muro de concreto armado, onde os tirantes da primeira linha

apresentam comprimento de 35,0 metros, os tirantes da segunda linha possuem comprimento de 30,0 metros e, o muro de concreto comprimento de 240,0 metros e altura de 4,0 metros.

No que diz respeito aos carregamentos, estes foram centralizados na circulação normal das composições ferroviárias, ou seja, sob velocidade de 80 km/h e vagões com carga média de 110 toneladas (aprox. 36 mil toneladas por composição). Ademais, de maneira conservadora, um ambiente hipotético de ocupação síncrona das duas linhas tronco por composições carregadas foi considerado.



Figura 6. Modelo numérico utilizado no Cenário 2.

A Figura 7 traz o FoS calculado devido a interação entre a operação ferroviária da EFC e a cortina atirantada associada aos trilhos ferroviários cravados previamente ao início da construção do muro de concreto armado. O resultado apresenta, ao nível da plataforma ferroviária, FoS congruente com os critérios descritos no Item 1.1 ($FoS \geq 1,5$). Similarmente ao percebido no Cenário 1, na plataforma do acesso construtivo em encoramento se observa FoS inferiores a 1,4 o que aponta para reforço local da plataforma construtiva, em caso desta ser convertida para um acesso de manutenção e/ou inspeção da cortina.

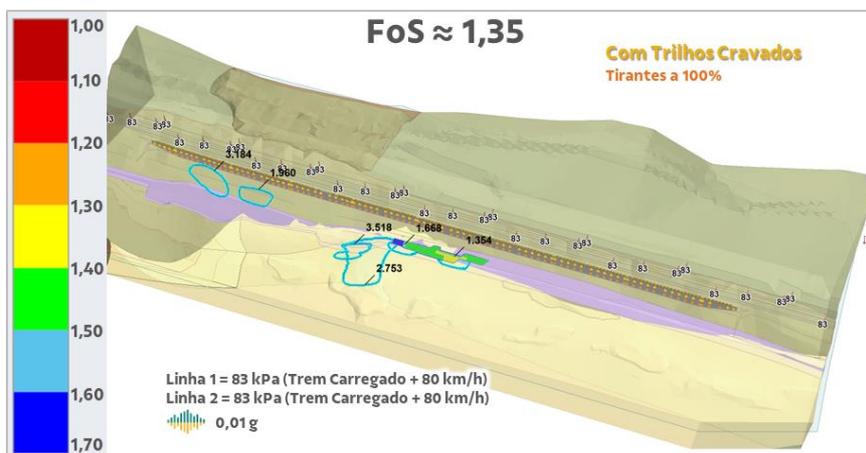


Figura 7. – FoS calculado para o Cenário 2.

4 COMENTÁRIOS FINAIS

O programa Slide3 v. 3.0 (Rocscience, 2023) foi empregado para melhor capturar o comportamento espacial da obra em tela. Este *software* emprega os conceitos do método de equilíbrio limite em um ambiente tridimensional, o qual confronta as forças resistentes (estabilizadoras) e forças mobilizantes (instabilizadores), de maneira a investigar o desbalanceamento das forças cisalhantes ao longo da superfície crítica de escorregamento. Além disso, as análises utilizaram o método de cálculo de Morgenstern-Price em virtude de seu rigor matemático, assim como a técnica de busca da superfície de escorregamento conhecida por *Particle Swarm Search (multiple failures)*, em razão do seu avançado algoritmo computacional de varredura das superfícies com maior desbalanceamento das forças cisalhantes. O *Particle Swarm Search* ainda possibilitou o cálculo de até seis superfícies críticas para cada nova corrida computacional do Slide3.

4.1 Limitações

Os resultados alcançados na presente reavaliação poderão divergir do comportamento real da obra de engenharia implantada, tal fato sendo explicado pela variabilidade natural dos parâmetros geotécnicos. Assim, o presente estudo reitera as usuais recomendações inerentes as obras geotécnicas, tais como:

- Mapeamento geológico-geotécnico durante a fase de implantação, por entender que esta atividade aportar muitíssimas informações que corroborarão para a otimização do projeto;
- Inspeções geotécnicas de campo durante e após o final da etapa construtiva;
- Instalação, acompanhamento e interpretação do sistema de monitoramento;
- Retroanálises de estabilidade contínuas e suportadas por informações de campo;
- Indicação clara e transparente das melhorias/ajustes do projeto e/ou serviços em execução;
- Testes de carga dos elementos de contenção e/ou sustentação como tirantes, grampos e chumbadores (por exemplo, teste de recebimento).

A reavaliação de estabilidade do km 378 foi realizada pelo *software Slide3* baseado no método de equilíbrio limite, o qual não é capaz de simular as várias etapas construtivas de um projeto de maneira associada. Da mesma forma, o método de equilíbrio limite não é capacitado a investigar os efeitos positivos e negativos da redistribuição das tensões decorrentes das diversas etapas construtivas.

4.2 Conclusões

Os resultados obtidos sinalizam para o importante papel dos trilhos ferroviários cravados no alcance dos níveis de segurança requeridos. Contudo, este prático elemento de reforço, por vezes, tem seus efeitos benéficos negligenciados devido esses elementos não serem apropriadamente modelados nos *software* bidimensionais disponíveis. De fato, a interação dos trilhos ferroviários cravados entre si, com os demais elementos estruturais e com próprio terreno, conduz a um contexto complexo que viola as hipóteses simplificadoras impostas pelas tradicionais análises bidimensionais.

O FoS calculado para o Cenário 1 pode estar sendo otimista, principalmente em razão da variabilidade natural dos parâmetros geotécnicos. Logo, a segunda linha de tirantes (Cenário 2) visa minimizar os eventuais impactos das incertezas geológicas e/ou geotécnicas. Por fim, a reavaliação da estabilidade do km 378 por um *software* tridimensional trouxe a luz setores na plataforma construtiva com FoS abaixo de 1,4, os quais descumprem os limites de aceitação de FoS superior a 1,5.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2009). ABNT NBR 11682: Estabilidade de Encostas. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 39p.
- ABNT (2021). ABNT NBR 16920-1: Muros e Taludes em Solos Reforçados - Parte 1: Solos Reforçados em Aterros. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 55p.
- KALATEHJARI, R., RASHID, A.S.A., ALI, N. & HAJIHASSANI, M. (2014). The Contribution of Particle Swarm Optimization to Three-Dimensional Slope Stability Analysis. *The Scientific World Journal*, John Wiley & Sons, 12p.
- KENNEDY, J. & EBERHART, R. (1995). Particle Swarm Optimization, *Proceedings of the International Conference on Neural Networks (ICNN'95)*, IEEE, Perth, Western Australia, Australia, 4: 1942-1948.
- LOPES, A.E.V. & NUNES, L.C. (2011). Intensidades Sísmicas de Terremotos: Formulação de Cenários Sísmicos no Brasil. *Revista USP: Catástrofes*, São Paulo, SP, 91: 90–102.
- Rocscience Inc. 2023, Slide3 version 3.0 – 3D Equilibrium Limit Analysis for Slopes. www.rocscience.com, Toronto, Ontario, Canada.