

Estudo de Instabilidade Geotécnica Em Um Aterro Ferroviário de Grande Porte no Estado do Rio de Janeiro

Alisson Silveira Sachetti

Eng. Civil, FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, alisson@fgs.eng.br

Felipe Gobbi

Eng. Civil, FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, felipe@fgs.eng.br

Camilly Tostes

Eng. Civil, MRS logística, Juíz de Fora, Brasil, camilly.tostes@mrs.com.br

Romário Lopes

Eng. Civil, MRS logística, Juíz de Fora, Brasil, romario.lopes@mrs.com.br

Diego Rosa

Eng. Civil, MRS logística, Juíz de Fora, Brasil, diego.rosa@mrs.com.br

RESUMO: Em fevereiro de 2023, durante a estação chuvosa no estado do Rio de Janeiro, ocorreu uma ruptura com grande movimentação de massa em um aterro ferroviário de grande porte no município de Quatis. Essa ferrovia tem grande importância econômica, pois visa transportar minério de ferro do estado vizinho de Minas Gerais para o transporte portuário no Rio de Janeiro. A ruptura no aterro interrompeu a passagem de trens na região, exigindo um plano de ação para estabilização emergencial. Nesse contexto, um projeto foi realizado para estabilizar o talude e criar um desvio na ferrovia existente, a fim de retomar as operações ferroviárias no local. Foram realizadas visitas em campo para compreender o movimento que ocorreu e fazer um diagnóstico preliminar da ruptura. Além disso, foi desenvolvido um plano de investigação geotécnica e monitoramento do talude. O diagnóstico preliminar de campo indicou um fluxo significativo de água superficial e subterrânea no talvegue onde aterro foi construído. As condições da estrutura em campo contribuíram para a saturação do aterro, reduzindo a estabilidade global do talude. Neste intervalo de tempo foi realizado um projeto emergencial de estabilização do talude que reduziu as deformações e permitiu a execução do plano de investigação. Este plano foi utilizado para fomentar o modelo geomecânico elaborado que serviu de base para o dimensionamento das estruturas de contenção e drenagem para estabilização do aterro ferroviário.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro, Estabilidade de Taludes, Ferrovia, Fluxo de Água Subterrâneo.

ABSTRACT: In February 2023, during the rainy season in the state of Rio de Janeiro, there was a rupture with significant mass movement in a large railway embankment in the municipality of Quatis. This railway is of great economic importance. The rupture in the embankment interrupted train passage in the region, requiring an emergency stabilization action plan. In this context, a project was carried out to stabilize the slope and create a diversion in the existing railway in order to resume railway operations at the site. Field visits were conducted to understand the movement that occurred and to make a preliminary diagnosis of the rupture. Additionally, a plan for geotechnical investigation and monitoring of the slope was developed. The preliminary field diagnosis indicated significant surface and groundwater flow in the valley where the embankment was built. The field structure conditions contributed to the saturation of the embankment, reducing the overall slope stability. During this time interval, an emergency slope stabilization project was carried out, which reduced deformations and allowed the execution of the investigation plan. This plan was used to foster the developed geomechanical model, which served as a basis for the project of containment and drainage structures for the stabilization of the railway embankment.

KEYWORDS: Embankment, Slope Stability, Railway, Groundwater Flow.

1 INTRODUÇÃO

Rupturas em taludes de corte ou aterro ferroviário representam, além de danos econômicos e ambientais, elevado risco aos colaboradores e comunidades vizinhas à ferrovia. Grande parte destas instabilizações estão relacionadas a períodos de elevada precipitação ou problemas envolvendo o sistema de drenagem de águas superficiais, subsuperficiais, ou, até mesmo, a inexistência destes subsistemas da estrutura ferroviária.

O trecho em estudo contempla um talvegue em encosta natural com taludes de aterro para manter o greide da ferrovia, local onde ocorreram movimentações que danificaram o sistema de drenagem existente, tendo sido observada ocorrência de trincas de tração próximas à linha ferroviária. As movimentações e o consequente dano ao sistema de controle de fluxo de água pode aumentar o aporte de água a maiores profundidades, aumentando a propensão a instabilizações, tanto de ordem local, quanto global.

Existem diversas possíveis causas para instabilidades de taludes e, portanto, torna-se difícil precisar as condições exatas que levaram os taludes do trecho de interesse a essas movimentações, sendo que este estudo visa elaborar um modelo geomecânico tendo como base as informações obtidas durante as visitas técnicas, ensaios de campo e laboratório, além do monitoramento geotécnico implantado no local. De posse deste modelo foi possível realizar uma série de análises de estabilidade por equilíbrio limite para buscar a posição do nível d'água crítico o qual ocasionou a movimentação.

É importante ressaltar que logo após as vistorias de campo, foi elaborado um projeto de emergência para aumentar o fator de segurança da estabilidade global do talude, baseado no conceito de abordar o principal fator instabilizante, as poropressões geradas pelo fluxo interno de água. Esse procedimento reduziu significativamente as deformações em curso do talude, permitindo que a equipe técnica envolvida no projeto ganhasse tempo para realizar investigações geotécnicas em campo e em laboratório, e o desenvolvimento do projeto de estabilização que consistiu em um balanço de massas, corte na porção superior e aterro junto pé da encosta, além de uma cortina atirantada próxima ao eixo da ferrovia, garantindo assim a segurança e retomada das condições normais de operação ferroviária.

2 GEOLOGIA REGIONAL

O recorte do mapa geológico da folha SF.23.Z.A.II – Santa Rita de Jacutinga, proposta por Heilbron et al. (2007), e apresentado na Figura 1, indica que no local de interesse ocorrem intercalados, biotita gnaisses bandados e sillimanita gnaisses bandados da Megassequência Andrelândia.

A unidade basal de biotita gnaisses bandados, de acordo com Heilbron et al. 2007, é caracterizada por gnaisses de composições variadas, sempre contendo plagioclásio e biotita, e subordinadamente granada. O bandamento composicional observado tem espessuras centimétricas a métricas e os contatos gradacionais entre as bandas de diferentes composições, sugerindo que esta estrutura representaria, pelo menos em parte, o acamamento sedimentar.

A unidade superior da Megassequência Andrelândia é constituída por granada-biotita gnaisses bandados, de derivação pelítica, ricos em biotita, granada e sillimanita abundantes intercalações métricas a centimétricas de rochas manganíferas, biotita gnaisses bandados, rochas calcissilicáticas sillimanita quartzitos, quartzitos puros e granada-plagioclásio gnaisses. Heilbron et al. 2007 ainda apresenta algumas medidas estruturais quanto a foliação destas litologias que, para local de estudo estão orientadas em média para 140/35 (direção de mergulho).

Rochas gnáissicas, tendem a formar solos igualmente bandados, e a alternância de bandas que concentram quartzo e feldspato com bandas ricas em biotita podem conduzir a comportamento anisotrópico tanto de resistência ao cisalhamento como de deformabilidade (Gobbi, 2005; Sandroni, 1985). Esta anisotropia é inversamente proporcional ao grau de intemperismo dos solos residuais, conforme demonstrado por Reis *et al.* (2003) e apresenta uma clara relação com a textura do solo em campo. Outro fator condicionante a alteração é a percolação de fluidos em descontinuidades, estas podem ter forte correlação com as orientações das foliações minerais e condicionar e desagregação do material que no contexto regional, estão orientadas na mesma direção do talude, favoráveis à instabilização.

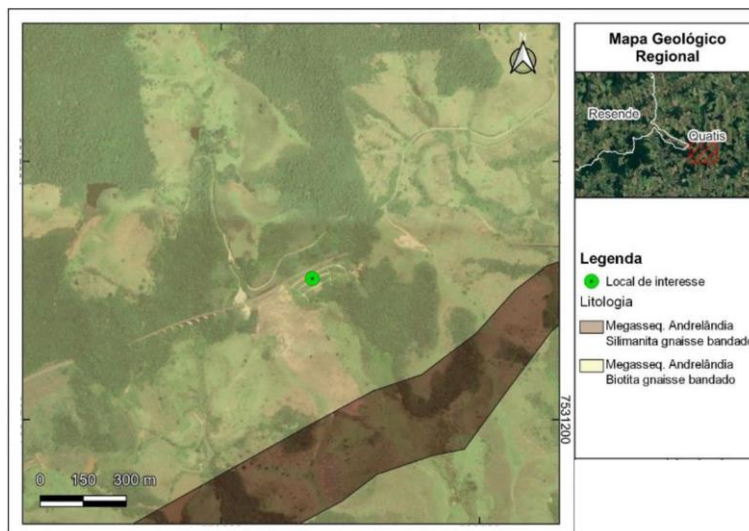


Figura 1. Mapa geológico regional (Modificado de Heilbron et al. 2007).

3 VISTORIA DE CAMPO

A Figura 3 apresenta a visão geral da condição da área no período da vistoria (2023) onde foram observadas trincas progressivas na região mobilizada. A ruptura gerou uma face escarpada próximo ao platô da ferrovia no eixo do vetor de movimentação. As drenagens nos patamares do aterro foram danificadas pelos deslocamentos ocorridos. E, no pé do talude de aterro, nos locais identificados na Figura 3 ficou evidenciado o final da região mobilizada e presença d'água acima da cota do terreno. Os indícios de campo levam a um diagnóstico de uma ruptura plano-circular influenciada pelo contato dos materiais naturais e do aterro com grande presença de água no local, surgências nas faces dos taludes mobilizados e região alagadiça no final do talvegue natural.

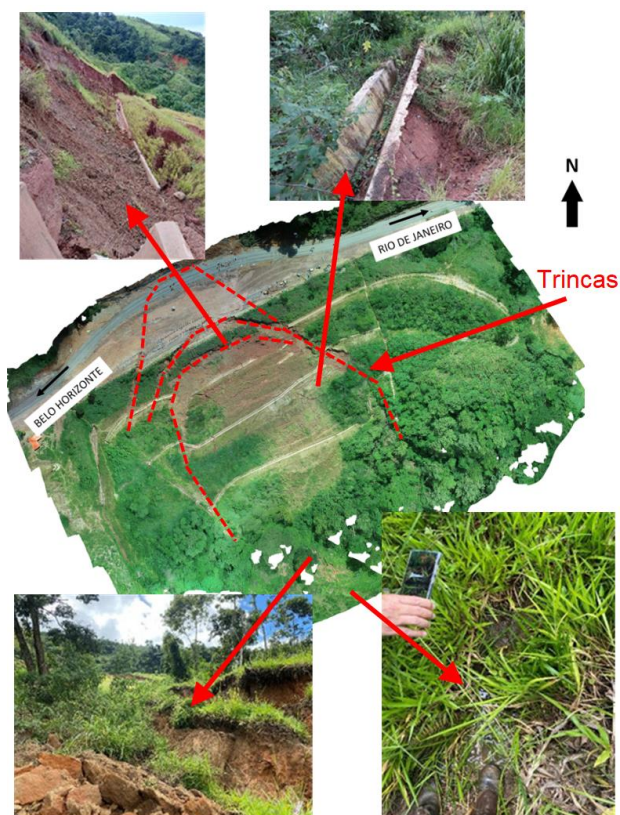


Figura 3. Vistoria de campo apresentando os indícios de uma movimentação do aterro ferroviário.

4 PLANO DE INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA

O plano de investigação geotécnica contou com levantamento planialtimétrico, sondagens geotécnicas, furos de reconhecimento, coleta de amostra dos materiais presentes no terreno e ensaios de caracterização e de resistência mecânica de laboratório, cuja posição é mostrada na Figura 4, sendo o plano de investigação revisado ao longo do trabalho à medida que novas informações eram necessárias para o entendimento do perfil geotécnico.



Figura 4. Plano de investigação geotécnica e alinhamento do perfil.

4.1 Sondagens Mistas, SPT e Furos de Reconhecimento

Foram executadas 4 sondagens mistas ao longo da região da crista do talude, além de 4 sondagens extras ao lado das posições originais para verificação da camada impenetrável devido a presença de aterro de blocos com dimensões variadas (bota fora da escavação do túnel e rachão utilizado para variante e ferrovia ao longo do tempo). Também foram executadas sondagens SPT ao longo do corpo do aterro e na região do pé para a verificação do contato do material de aterro com o solo residual, ou impenetrável ao trépano. Contudo, as sondagens de SPT foram insuficientes para demonstrar o contato solo/rocha e para isto foram realizadas as sondagens mistas nas porções inferiores do talude, viabilizadas pelo acesso de obra executado.

Além das sondagens, também foram disponibilizados os resultados de 4 furos de reconhecimento localizados ao longo do pé do talude com o intuito de verificar a cota de contato entre os diferentes materiais.

De acordo com as sondagens disponibilizadas, é possível verificar que o nível d'água (NA) se apresenta inclinado com a mesma direção do terreno, visto que nas sondagens de montante (SM-INC-02, SM-INC-02A e SM-INC-02B) o nível freático se apresenta mais próximo a superfície quando comparado com os resultados das sondagens a jusante da ferrovia (SM-INC-03, SM-INC-03A e SM-INC-03B). Entretanto, é necessário destacar que as sondagens foram realizadas em período seco e o nível d'água no interior do maciço é sazonal, se apresentando elevado mesmo nesta condição. As sondagens mistas realizadas na plataforma da ferrovia indicam a presença da rocha sã com cotas superiores se comparadas com as sondagens realizadas no corpo e pé do aterro.

4.2 Perfil Geotécnico Interpretado

A Figura 5 apresenta o perfil geotécnico elaborado a partir da campanha de investigação. Um ponto importante para descrição do perfil elaborado é o contato do aterro com solo residual maduro. Este contato não é de fácil separação, pois nas sondagens não fica claro em termos de aspectos visuais e de resistência a interface entre um material e outro. Isto pode ser justificado pelo fato de que o aterro foi executado com o mesmo

material local. Portanto, como a resistência e os aspectos físicos são semelhantes ambos os materiais foram tratados de maneira homogênea na porção intermediária do talude. Já próximo ao pé este contato é mais evidente, inclusive em termos de resistência.

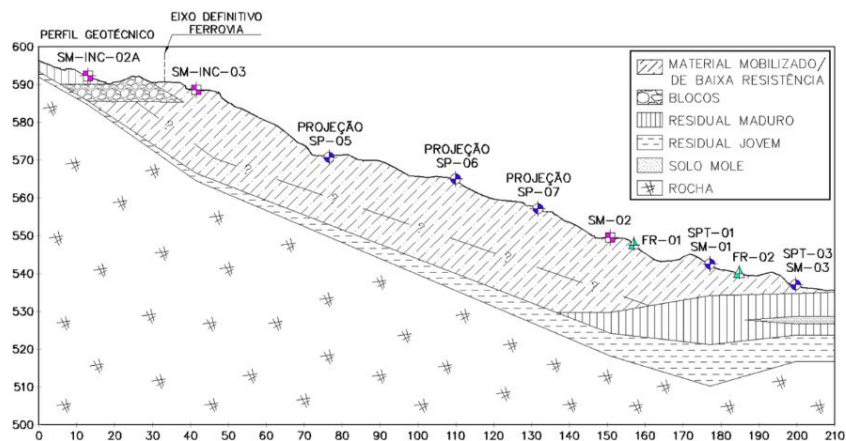


Figura 5. Perfil geotécnico interpretado.

Na porção superior do talude, conforme observado nas sondagens, foi identificado um aterro de blocos com dimensões variadas provenientes de um antigo bota fora da escavação do túnel próximo ao ponto e, além disto, uma quantidade considerável de material pétreo utilizado para a estrutura ferroviária. Este material tem influência nas condições de drenagem interna na parte superior do aterro, facilitando a percolação de água e saturação da massa de solo nos períodos de intensa pluviosidade.

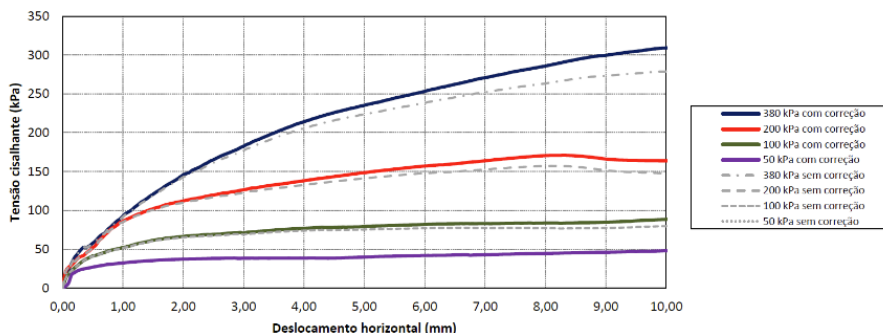
4.3 Ensaios de Laboratório

De acordo com o plano de investigação, foi prevista a retirada de uma amostra indeformada posicionada fora da região mobilizada no aterro (AM 01) e uma amostra no residual (AM 02) a qual não se teve sucesso na retirada da amostra indeformada.

Além de ensaios para a determinação dos parâmetros de resistência, foram realizados ensaios de caracterização básica (granulometria por peneiramento e sedimentação, peso específico real dos grãos, teor de umidade e limites de Atterberg) resultando em um material classificado como uma argila de baixa plasticidade.

Para a amostra AM-01 foram previstas a moldagem de 4 corpos de prova de cisalhamento direto para as tensões normais de 50, 100, 200 e 400 kPa, sendo estes realizados no sentido convencional topo-base, material de aterro sem estruturação, isotrópico. Em todos os ensaios, independentemente da curva de adensamento obtida na fase anterior à fase de cisalhamento, foi adotada a velocidade de carregamento constante de 0,05 mm/min (3,00 mm/h), evitando a geração de excesso de poropressão durante o cisalhamento dos corpos de prova.

A Figura 6 apresenta o comportamento mecânico obtido para os ensaios de cisalhamento. O material se mostrou dúctil. Em relação ao comportamento volumétrico foi identificada dilatação para tensão vertical de 50kPa, contudo sem a formação de pico pronunciado na curva tensão-deslocamento.



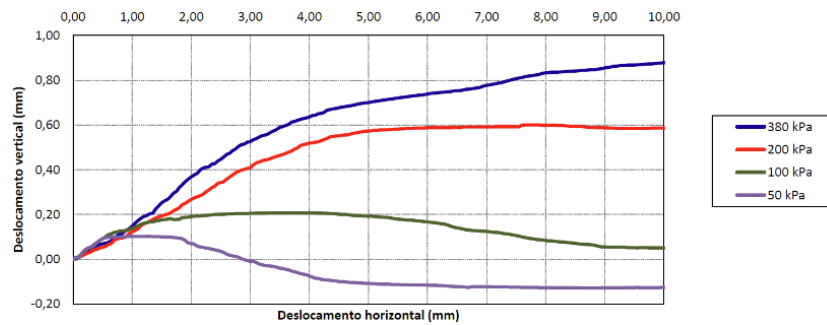


Figura 6. Comportamento mecânico do material de aterro ensaiado (cisalhamento direto inundado).

Para análise do conjunto de parâmetros a ser adotado foi utilizado um deslocamento horizontal fixo de 3,0mm e avaliado a tensão cisalhante de cada ensaio neste ponto, resultando em um comportamento bi linear, onde para tensões normais superiores a 250 kPa a envoltória tende a um menor coeficiente angular. Para o problema de estabilidade do talude em questão, são adotadas tensões normais menores em função das profundidades das superfícies de ruptura críticas, logo foi adotado o ajuste linear para aplicação do critério de ruptura de Coulomb para os pontos com tensão normal inferiores a 250 KPa. A Figura 7 apresenta a interpretação dos resultados de cisalhamento direto. Com isso, os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos a partir da interpretação dos ensaios está apresentado na Tabela 1 para o aterro não mobilizado. Estes parâmetros serão utilizados como ponto de partida para as análises de estabilidade a serem apresentadas a seguir.

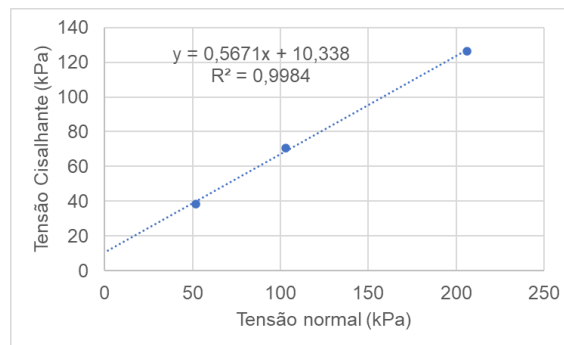


Figura 7. Envoltória de resistência interpretada.

Tabela 1. Peso específico e parâmetros de resistência interpretados.

Amostra	$\gamma_{n,médio}$ (kN/m ³)	$\gamma_{d,médio}$ (kN/m ³)	ϕ' (°)	c' (kPa)
AM-01	19	16	29	10

5 ANÁLISES DE ESTABILIDADE E DIAGNÓSTICO DA RUPTURA OCORRIDA

5.1 Análise de Estabilidade Bidimensional

Para as análises 2D foram seguidas as seguintes considerações/simplificações do modelo matemático: Foi utilizado o programa Slide da empresa Rocscience para execução das análises em equilíbrio limite; Foram consideradas análises bidimensionais em estado plano de tensões de corpos rígidos; Foi considerado o método de equilíbrio limite consagrado na geotecnia de GLE-Morgenstern-Price, Bishop & Morgenstern (1960), (equilíbrio de forças e momentos com interação completa entre as fatias); Foi avaliada a line of thrust (linha de empuxo), conforme indicado no manual do software (ROCSCIENCE, 2020), indicativa das tensões normais para averiguar se no cálculo de equilíbrio há esforços de tração nas fatias, indesejáveis por algum problema de convergência das superfícies obtidas pelos métodos de busca aplicados; Foram utilizadas ao menos 03 metodologias de busca de raio circular e círculo-planar com refinamento matemático adequado ao problema, sendo elas: Simulated Annealing, Cuckoo search e Particle Swarm (PSO), onde foram avaliadas as iterações para a convergência do valor de FS obtido para cada cenário; Foi avaliado o refinamento matemático para cada

método de busca de superfície crítica, aumentando-se o número de iterações até a convergência do fator de segurança obtido.

Com algumas das condições de contorno do modelo definidas, partiu-se para busca de informações quanto às variáveis do problema para aferição do modelo. As análises procederam basicamente da seguinte forma: Foram utilizados os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos a partir de todas as informações coletadas, trabalhos pregressos, ensaios de campo e ensaios de laboratório; Buscou-se geometrias de rupturas circulares e plano circulares, de maneira a mimetizar a geometria da ruptura observada em campo; Buscou-se o nível d'água crítico para cada mecanismo de ruptura levantado como hipótese para as movimentações observadas; Foi realizada uma análise de sensibilidade do nível d'água para avaliação do FS para cada cenário de análise.

5.4 Retroanálise da Ruptura

Quando ocorre a ruptura de um talude, sabe-se que as tensões cisalhantes atuantes atingiram o limite da resistência ao cisalhamento do solo por onde a ruptura se desenvolveu. Sabendo-se a geometria e a condição de saturação das camadas de solo/rocha, é possível obter a envoltória de resistência ao cisalhamento do material, partindo-se do pressuposto que o fator de segurança do talude é igual a 1,00 (estado de iminência de ruptura). Desta forma, a retroanálise pode ser considerada como um ensaio de verdadeira grandeza para determinação ou balizamento da resistência ao cisalhamento do solo ou rocha, caso sejam conhecidas as demais condições de contorno. Entretanto, as condições de contorno em um problema real não são tão facilmente conhecidas, tal como a saturação do talude no momento da ruptura, o que dificulta a determinação precisa dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais através deste procedimento.

A Figura 8 apresenta o resultado da análise pelo método GLE (Morgenstern-Price) e busca de superfície PSO (Particle Swarm) conforme Kennedy & Eberthart (1995), onde as várias superfícies críticas de ruptura apresentadas pelo enxame apresentaram valores semelhantes de FS (fator de segurança por equilíbrio limite) com raios distintos. A posição do NA (nível d'água) obtido no processo é alta, conforme observado nas vistorias de campo.

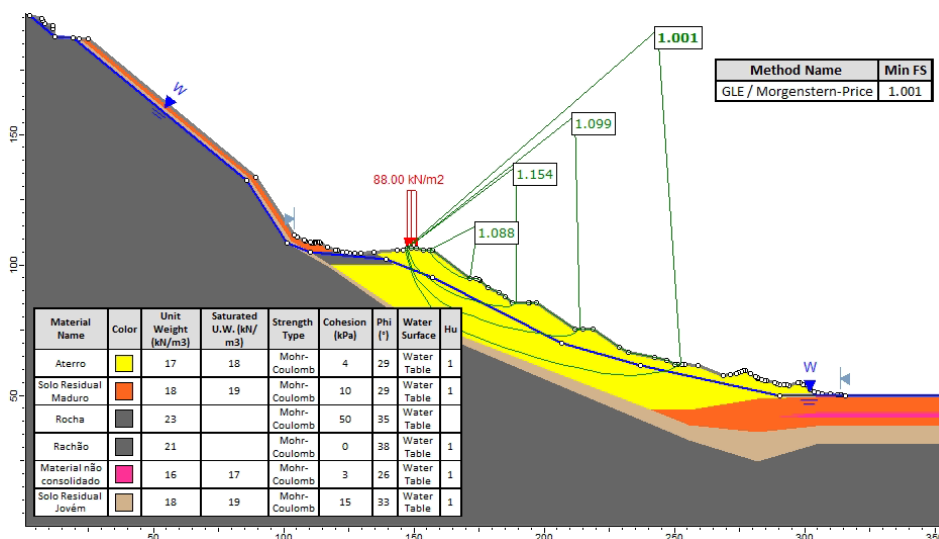


Figura 9. Resultado da retroanálise da ruptura para a seção de cálculo (primeira mobilização anterior a 2022).

No período chuvoso de 2023 a ruptura antiga foi reativada e iniciou um processo retrogressão avançando para montante da ferrovia e comprometendo todo o aterro. Este cenário foi avaliado quanto a sua estabilidade para balizar o modelo geotécnico elaborado, onde os parâmetros de resistência ao cisalhamento do aterro foram penalizados, principalmente no intercepto coesivo para a condição de material mobilizado. Esta análise pode ser verificada na Figura 10, condição da ruptura no período chuvoso de 2023.

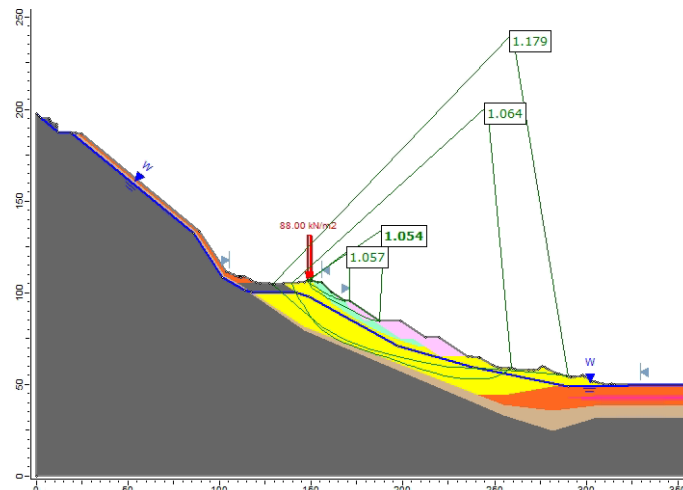


Figura 10. Resultado da análise da ruptura para a seção de cálculo (ruptura ocorrida em 2023).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme apresentado neste artigo, os resultados obtidos confirmam que o aumento do NA no perfil, facilitado pelo bota-fora de blocos de rocha no corpo do aterro junto a ferrovia, é o gatilho para as movimentações observadas. Devido a importância do NA nos cálculos foram realizadas análises de sensibilidade para obtenção do fator de segurança FS em cada cenário de modificação geométrica do talude, sendo que os resultados obtidos refletem para as condições observadas em campo. Estas análises apresentam que em períodos chuvosos intensos o FS do talude, possivelmente, esteve próximo da unidade, condição limite de estabilidade, sendo que possíveis alterações de drenagem ou incremento de água no maciço do aterro poderiam levar a estrutura de solo a ruína.

De posse deste estudo e elaboração do modelo geotécnico foi possível nas etapas seguintes do estudo a elaboração do projeto de contenção e estabilização do talude para retomada da operação ferroviária sem restrições. Adicionalmente foi elaborado um plano de instrumentação e monitoramento do talude, a fim de monitorar tanto as poropressões como os deslocamentos do talude e estruturas de contenção projetadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a equipe da FGS Geotecnia e MRS Logística pelo apoio neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bishop, A. W. & Morgenstern, N. (1960). Stability coefficients for earth slopes. *Géotechnique*, P. 129-150.
- Gobbi, F.S. (2005). Estudo do comportamento geomecânico de um solo residual do Gnaisse Porto Alegre. Dissertação de Mestrado. PPGEC UFRGS.
- Kennedy, J.; Eberhart, R. (1995). "Particle Swarm Optimization". *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*. Vol. IV. pp. 1942–1948.
- Reis, R.M., Vilar, O.M., Azevedo, R.F. (2003) Strength and deformation characteristics of a saturated residual soil profile. *Deformation Characteristics of Geomaterials*, Di Benedetto et al. (eds.) 2003 Swets e Zeitlinger, Lisse. P.443-450.
- Rocscience (2020), Slide - 2D limit equilibrium slope stability for soil and rock slopes – Slope Stability Verification Manual . Retrieved from <https://www.rocscience.com/>.
- Sandroni, S.S. (1985). Sampling and testing of residual soils - A review of international practice, *Proceedings...* Scorpion Press (Hong Kong).
- Heilbron, M. et al. 2007. Mapa Geológico da Folha Santa Rita de Jacutinga SF.23-Z-A-II 1:100.000. PRM. Serviço Geológico do Brasil. UERJ. Rio de Janeiro/ Minas Gerais.