

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/216

Estudo e Projeto de Estabilização de um Talude Ferroviário sobre Material Coluvionar

Ricardo José W. Menezes

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

Alisson Silveira Sachetti

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

Felipe Gobbi Silveira

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

Romário Lopes

Eng. Civil, MRS Logística, Juiz de Fora, Brasil, romario.lopes@mrs.com.br

Camila Rabite

Eng. Civil, MRS Logística, Juiz de Fora, Brasil, camila.rabite@mrs.com.br

RESUMO: Em um aterro ferroviário, depois de várias décadas após sua construção, foram reportadas movimentações significativas, identificadas através de diversas trincas no terreno. A partir desses problemas relatados, foi feito um estudo do local e das condições que teriam levado esse talude a uma condição instável. O estudo se baseou na execução de um plano de investigação geotécnica, baseado em sondagens mistas, SPT e ensaios de laboratório. Os resultados indicaram a presença de uma camada de solo coluvionar sob o aterro existente. Se observou também que nos últimos anos foi construída uma estrada vicinal a montante da ferrovia, que bloqueou o sistema de drenagem superficial nessa área, provocando represamento de água nessa área durante períodos de intensa precipitação. Conhecendo-se as condições do local, o perfil geológico e os parâmetros geotécnicos de resistência dos principais materiais envolvidos na instabilidade identificada, se buscou as condições hidrogeológicas que teriam levado o talude à ruptura, empregando-se análises de equilíbrio limite que pudessem representar a ruptura ocorrida. Como medida de estabilização, foi proposta a execução de um projeto em duas fases, onde a primeira fase garantiria a segurança operacional da ferrovia, enquanto a segunda fase proporcionaria segurança a todo o talude acometido pela instabilidade. Para acompanhamento das condições futuras do terreno também foi proposto um plano de monitoramento.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro Ferroviário, Estabilidade de Taludes, Talude Coluvionar, Nível freático

ABSTRACT: On a railroad embankment, after many decades since its construction, significant movements were reported, identified through many cracks in the terrain. Following these issues, a site study was conducted to examine the conditions that have led this slope to an unstable condition. The study involved implementing a geotechnical investigation plan, which included borehole core logging, SPT, and laboratory tests. The results indicated the presence of a colluvial soil layer beneath the existing embankment. It was also observed that a local road had been built upstream of the railway during the last few years, obstructing the surface drainage system in the area and causing water buildup during periods of heavy rainfall. Knowing the site's conditions, geological profile, and geotechnical parameters of the main materials involved in the instability, efforts were made to understand the hydrogeological conditions that had led the slope to failure, making use of limit equilibrium analyses to represent the occurred failure. As a stabilization measure, a two-phase project was proposed, with the first phase ensuring the operational safety of the railway, while the second one would provide stability to the entire affected slope. Additionally, a monitoring and surveillance plan was proposed to evaluate the terrain's conditions over time.

KEYWORDS: Railroad Embankment, Slope stability, Colluvial slope, Groundwater level.

1 INTRODUÇÃO

Rupturas em taludes de corte ou aterro ferroviário representam, além de danos econômicos e ambientais, frequentemente um risco aos colaboradores de operação. No Brasil, grande parte destas instabilizações estão relacionadas a períodos de elevada precipitação, podendo ocorrer devido a causas naturais, modificações no terreno ou problemas envolvendo o direcionamento de águas superficiais ou subsuperficiais.

Numa região do extremo sul do estado de Minas Gerais, próximo ao limite com o Rio de Janeiro, foi construída uma ferrovia há mais de 30 anos para escoamento da produção de minério. Num dos trechos dessa ferrovia, situado em um vale do Rio Paraibuna, foi necessária a execução de cortes a montante e aterro a jusante. A construção desse aterro foi feita em bancadas com até 10,0 m de altura e inclinações da ordem de 30°, porém o conjunto de bancadas abrangidas pela ruptura contava com altura total inferior a 30,0 m e inclinação global de 15°. O aterro foi executado acompanhado de um sistema de drenagem superficial.

Posteriormente, houve a construção de uma Usina Hidrelétrica (UHE) nas imediações, possivelmente impactando o terreno nas adjacências devido a mudanças nas condições hidrogeológicas de represamento de água, circuitos de adução, rodovias pavimentada de acesso ao sistema da Usina, entre outros, sendo que uma rodovia de acesso à casa de máquinas foi executada sobre o aterro da ferrovia.

Recentemente, foram constatados danos da rodovia de acesso à UHE e no sistema de drenagem superficial do aterro a jusante da ferrovia, além de uma série de trincas no terreno. Em caráter emergencial, foi modificado o eixo da ferrovia em direção a montante, afastando-a das trincas. Segundo relatos de colaboradores da concessionária da ferrovia, foi construída uma estrada de acesso local sem supervisão que obstruía o fluxo longitudinal de água, causando acúmulo de água por represamento na lateral da linha férrea, provocando aumento local no nível freático. Para evitar o acúmulo de água a montante, foi executado também um sistema de drenagem complementar com sarjetas e bueiros. Uma das dificuldades encontradas para a compreensão das condições geomecânicas que culminaram em movimentações tão expressivas é a falta de dados de projeto e construção do aterro e da ferrovia ou de modificações posteriores.

Para que fosse solucionado o problema, foram conduzidos estudos e elaborado um projeto de estabilização geotécnica que garantisse a segurança do local de maneira definitiva.

2 VISTORIA DE CAMPO

Como etapa fundamental na compreensão das movimentações reportadas, foram conduzidas vistorias de campo ao longo da área acometida por trincas e de seu entorno, realizadas pela concessionária e pela projetista, tanto através de levantamento com drones quanto terrestres. Na Figura 2 é apresentada uma planta sobre imagem de satélite, enquanto a Figura 3 traz uma imagem aérea do talude próximo à ferrovia previamente à mudança em seu eixo.

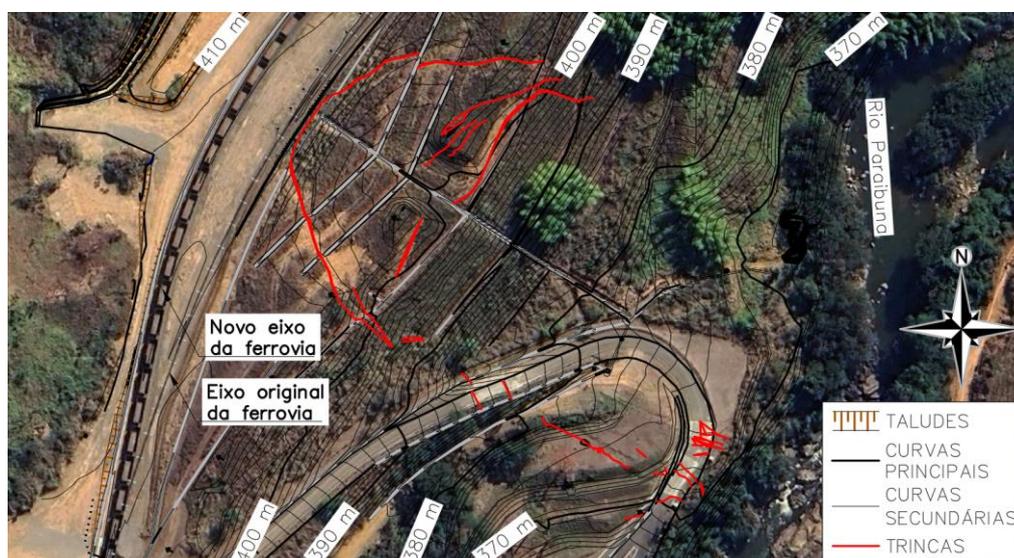


Figura 2. Curvas de nível sobre imagem de satélite do local.

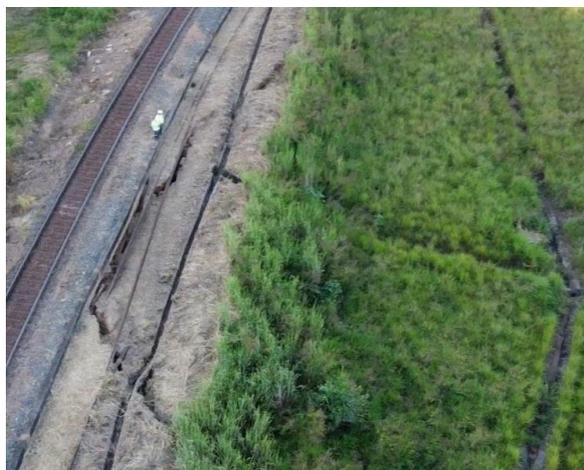


Figura 3. Trincas longitudinais no lado de jusante da ferrovia anteriores à mudança em seu eixo.

Na Figura 4 podem ser observadas trincas formadas pela deformação do solo, com desnível aparente devido à deformação vertical (recalque) da porção mobilizada pela ruptura. Na região mais próxima à ferrovia (Figura 4a) se nota o espraiamento da superfície de escorregamento, enquanto nas proximidades da crista do talude de aterro (Figura 4b) é observada uma geometria mais próxima da transversalidade em relação ao talude e à ferrovia. Nota-se que os danos provocados ao sistema de drenagem superficial na região de abatimento facilitam o aporte de água para dentro da zona mobilizada.



Figura 4. Região superior do talude (a) próximo à ferrovia; (b) próximo à crista do aterro.

Já na porção intermediária do talude se observou uma outra trinca longitudinal (Figura 5a), configurando a ocorrência de uma segunda ruptura contida dentro da ruptura principal. Mais a jusante, se observou que um trecho da rodovia foi também dividido pela zona de movimentação, necessitando reparo que precisou ser executado para contemplar a distorção entre o maciço de solo estável e instável (Figura 5b).

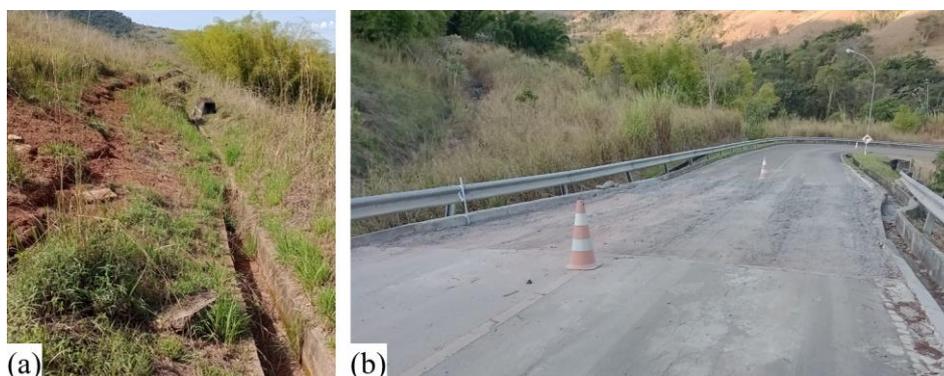


Figura 5. Região intermediária do talude (a) trinca longitudinal; (b) pavimento reconstruído com desvio angular devido à deformação do terreno.

Já na área do pé da ruptura, em vez de recalques do trecho mobilizado foi observado, além de deformação horizontal, o soerguimento de solo (Figura 06a), atestando a ocorrência de uma ruptura com superfície de escorregamento elíptica ou plano-circular. Mais abaixo, às margens do Rio Paraibuna, foi possível observar a presença de afloramentos rochosos de gnaiss e algumas pedras provavelmente dispostas manualmente na margem (Figura 06b). Essa região não apresentou indícios de movimentação, sendo o pé da ruptura provavelmente na transição estratigráfica entre o solo coluvionar e um material menos alterado.

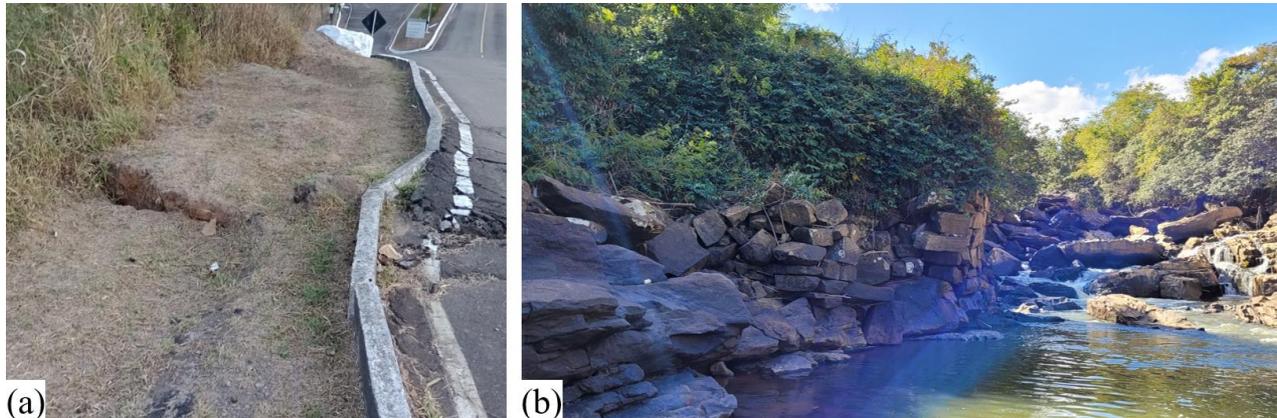


Figura 6. Região inferior do talude (a) soerguimento do terreno no pé da ruptura; (b) Maciço rochoso e pedras arrumadas na margem do Rio Paraibuna sem indícios de movimentação.

3 INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA E MODELO GEOMECÂNICO

Com base em estudo da CPRM (2016), existe no local de interesse a ocorrência de rochas do Grupo Raposo com faixas intercaladas ao Complexo Juiz de Fora. O Grupo Raposo é definido pela ocorrência de paragnaisses, podendo ocorrer biotita xisto subordinados, calcissilicáticas, mármore, quartzitos e concentrações de óxidos de manganês e anfíbolitos. Já sob denominação de Complexo Juiz de Fora estão englobadas rochas metamórficas ortoderivadas do paleoproterozoico, com paragênese para fácies granulito (VALLADARES et al., 2012). Os ortogranulitos deste complexo tornam-se ortognaisses cinzentos de textura protomilonítica, milonítica ou ultramilonítica próximo às superfícies de empurrão geradas durante a Orogênese Brasileira.

Para melhor compreensão das condições geotécnicas do local, foi proposto um plano de investigação geotécnica baseado em sondagens (SPT e mista) e coleta de amostras indeformadas para realização de ensaios de caracterização e resistência mecânica (amostras AM-01 e AM-02 em aterro e amostra AM-03 em solo residual de gnaiss), conforme mostrado na Figura 7. Posteriormente, com o resultado das sondagens, se observou a presença de solo coluvionar, porém não foi possível realizar amostragem desse material. Na Figura 8 é apresentado o modelo geológico elaborado a partir das sondagens e mapeamento de campo, bem como uma seção geológica situada aproximadamente no eixo da movimentação.

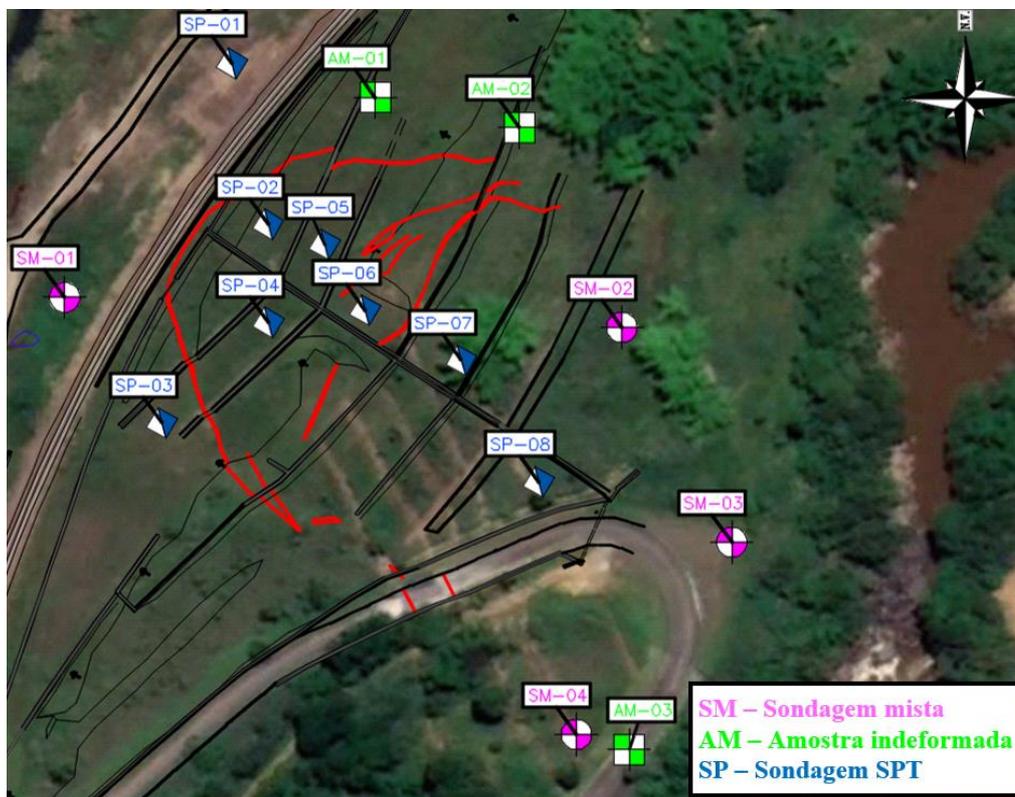


Figura 7. Plano de investigação geotécnica.

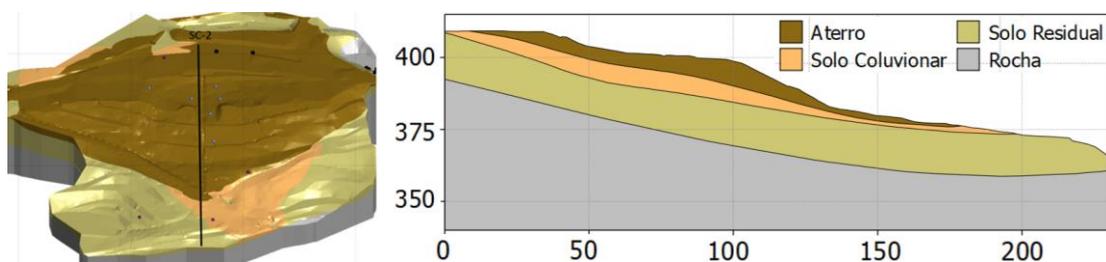


Figura 8. Modelo geológico tridimensional (vista frontal) e seção no eixo da movimentação.

Os parâmetros geotécnicos do aterro foram obtidos a partir de ensaios de cisalhamento direto inundados e drenados, enquanto para o solo residual foram conduzidos ensaios de compressão triaxial consolidados isotropicamente e não drenados (CIU). Para a determinação dos parâmetros geotécnicos do colúvio foram utilizados dados de bibliografia sobre colúvios e solos de gnaiss da região, calibrados com a realização de retroanálises. Como o maciço em questão já havia sofrido elevadas deformações, devido à reorientação entre as partículas de solo, conforme mencionado por D'Appolonia et al. (1967), esperava-se que a resistência disponível do material estivesse entre a de pico e a residual, com perda do intercepto coesivo.

Para a elaboração da retroanálise, foi elaborada uma análise bidimensional por equilíbrio limite, a partir de uma seção posicionada aproximadamente no eixo da ruptura. Nos cálculos foi considerado o método de Morgenstern-Price com superfícies plano-circulares e a busca da superfície crítica realizada por meio do método de otimização metaheurística de *Particle Swarm Optimization* (PSO). Na Figura 9 é mostrado o resultado da superfície de ruptura de retroanálise e demais potenciais superfícies de ruptura com baixo fator de segurança calculados para o talude em questão, sendo encontrado um valor de ϕ' do solo coluvionar igual a 20° e c' nulo nessa condição. Os parâmetros de resistência adotados são indicados pela Tabela 1, sendo que para a rocha pouco alterada foi considerada resistência infinita, implicando que nenhuma superfície de escorregamento atingindo esse material foi considerada.

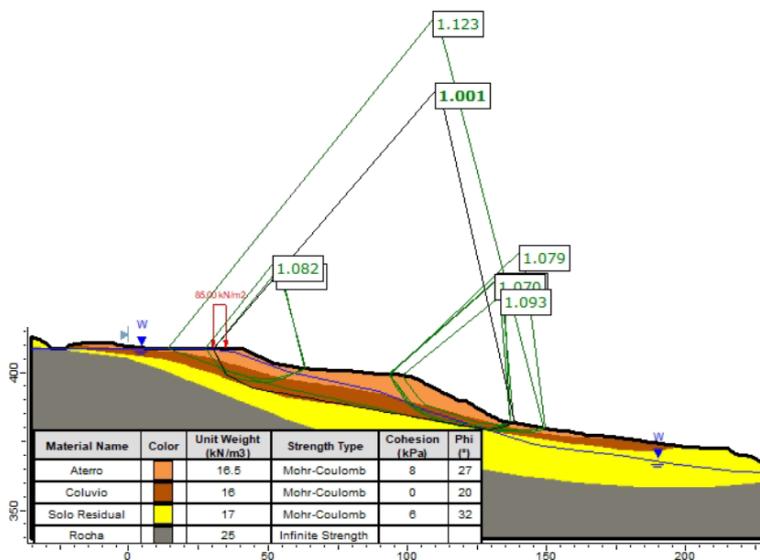


Figura 9. Resultado da retroanálise.

Tabela 1. Parâmetros geomecânicos dos materiais considerados o modelo.

Material	γ'_N (kN/m³)	ϕ' (°)	c' (kPa)
Aterro	16,5	27	8
Solo natural residual	17	32	6
Colúvio	16	20	0
Rocha gnaisse	25	-	-

4 PROJETO DE ESTABILIZAÇÃO

Segundo Du et al. (2013) e Leung e Ng (2013), movimentações em solos coluvionares geralmente estão associadas a aumento no nível de água ou perda de sucção, ocorrendo sazonalmente, frequentemente com grande efeito de fluência. Segundo informações do local e dados obtidos de retroanálise, o gatilho da movimentação em questão é um aumento excessivo no nível freático. Por isso, a solução de estabilização deveria contar com soluções de engenharia que pudessem controlar o nível de água dentro de limites aceitáveis. Portanto, além de um sistema de drenagem superficial, foram previstos drenos horizontais profundos (DHPs), cuja eficácia já foi reportada por Ehrlich et al. (2018) para proporcionar aumento da estabilidade. Segundo a NBR 11682 (ABNT, 2009), para o local em questão o fator de segurança mínimo aceitável seria de 1,50, o que representa um aumento expressivo em relação ao fator de segurança original. Assim, além de soluções baseadas no controle das poropressões, foi necessária a utilização de medidas ativas de estabilização. Devido ao grande volume de solo instável, qualquer obra de estabilização demandaria intervenções robustas e, portanto, demoradas. Por isso, o projeto foi dividido em duas fases, sendo que na primeira fase seria proporcionado um aumento no fator de segurança local de 1,50 na área da ferrovia, garantindo segurança na utilização da ferrovia, enquanto na segunda fase seria atingido um fator de segurança global de 1,50, proporcionando maior segurança também nas áreas a jusante mesmo caso os drenos profundos parem de funcionar.

A solução da fase 01 contará com escavação da porção superior da massa rompida, concomitantemente à execução de uma cortina atirantada sobre estacas, executada em fase descendente e em nichos, conforme preconizado pela NBR 9061 (ABNT, 1985), reduzindo assim as deformações próximas à ferrovia. Para controle do fluxo subsuperficial, foi prevista a execução de um trincheira drenante granular (dreno subsuperficial) a montante da ferrovia e DHPs, sendo a drenagem superficial realizada através de sarjetas de concreto armado no pé e na crista da cortina e direcionadas para um canal principal. Na Figura 10 é mostrada uma seção do projeto da Fase I.

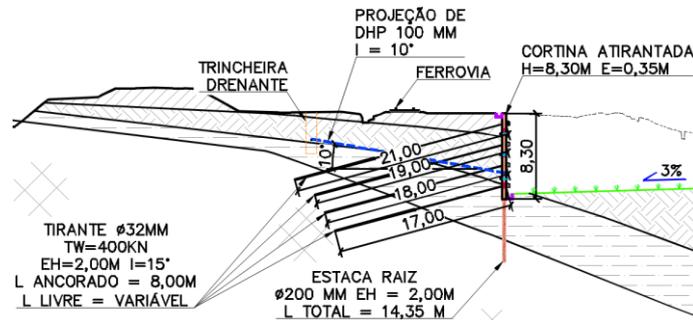


Figura 10. Seção típica da Fase 01 do projeto de estabilização.

Já a fase II exigirá a utilização do volume escavado da Fase I e a utilização de material de empréstimo para construção de um aterro no pé da ruptura. O aterro deverá ser feito em bancadas de aterro compactado, com o emprego de um colchão drenante na transição entre o terreno original e o aterro, sendo prevista uma outra linha de DHPs em sua porção superior e sarjetas de drenagem em cada uma das bancadas cujo direcionamento de água é feito para um canal principal central, ligado a uma bacia de dissipação no platô inferior. Tanto o trecho escavado quando o aterro deverão ser revegetados após a obra para redução de processos erosivos. Na Figura 11 é mostrada uma seção ilustrativa da Fase II de projeto, sendo o resultado da análise de estabilidade para essa condição final mostrada na Figura 12, onde é garantido um fator de segurança de 1,50 mesmo no caso de os drenos terem seu funcionamento comprometido em períodos futuros.

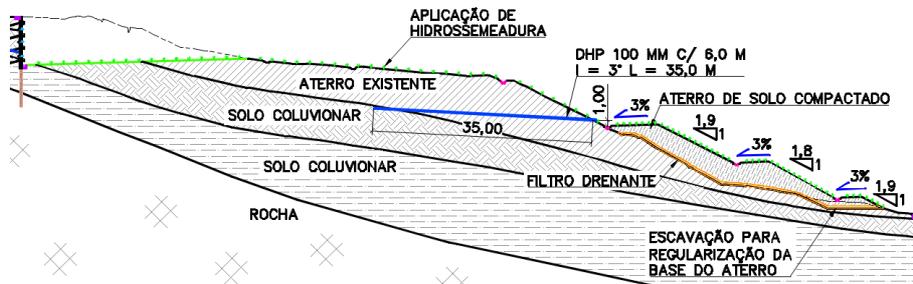


Figura 11. Seção típica da Fase 02 do projeto de estabilização.

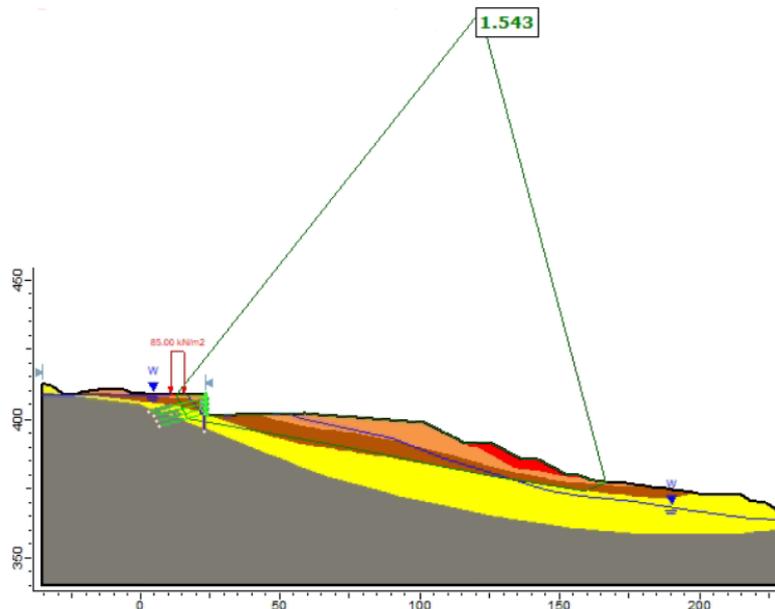


Figura 12. Resultado da análise de estabilidade do projeto finalizado.

Complementarmente ao projeto, foi previsto um sistema de monitoramento através da instalação de piezômetros, inclinômetros, indicadores de nível de água, marcos topográficos e células de carga nos tirantes,

cujo objetivo é o acompanhamento das condições previstas e das variáveis climáticas, permitindo que seja estudado o comportamento da solução, níveis de alerta de utilização e subsidiando a avaliação da necessidade de serviços de manutenção dos elementos de projeto.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho abordou a ocorrência de uma ruptura de um aterro ferroviário que, apesar de sua baixa declividade, foi ocasionada pela mobilização da massa coluvionar subjacente a ele. O diagnóstico da ruptura apontou que a elevação do nível d'água na região do aterro devido a alterações do direcionamento d'água ocorrido a montante da ferrovia, além de mudanças no pé do aterro com a implantação da estrada de acesso a UHE corroboraram para ativação da movimentação observada. O plano de investigação geotécnica realizado foi fundamental para elaboração do modelo geomecânico, o qual permitiu através de retroanálises balizar os parâmetros adotados e obter a representação do nível d'água que foi o gatilho para as movimentações.

De posse do modelo e nível d'água crítico, partiu-se para o dimensionamento das soluções de estabilização com o uso de terraplenagem junto ao pé do talude (acréscimo de peso abaixo da linha neutra), uma estrutura de contenção com tirantes protendidos (próximo a ferrovia), além de controle do nível freático através de drenos profundos, garantindo a segurança na operação da ferrovia e da área a jusante afetada pela movimentação. Para acompanhamento das condições do talude e da contenção ao longo do tempo foi proposto um plano de monitoramento com indicadores de nível de água, piezômetros, inclinômetros, marcos topográficos e células de carga nos tirantes da cortina.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FGS Geotecnia e a MRS Logística pelo suporte na realização deste trabalho e fornecimento dos dados técnicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1985). NBR 9061. *Segurança de escavação a céu aberto*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.
- CPRM (2016). *Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais 1:100.000*. Geologia e Recursos Minerais do Estado de Minas Gerais – Programa Geologia do Brasil, Serviço Geológico Brasileiro, Ministério de Minas e Energia - Brasil.
- D'Appolonia, E. D., Alperstein, R., D'Appolonia, D. J. (1967) Behavior of a Colluvial Slope. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, vol. 93, no. 4, pp. 489-518.
- Du J, Yin K, Lacasse S (2013) Displacement prediction in colluvial landslides, Three Gorges Reservoir, China. *Landslides* 10(2):203–218.
- Ehrlich, M., Costa, D. P., Silva, R. C. (2018). Behavior of a coluvial slope located in Southeastern Brazil. *Landslides*, vol. 15, 1595-1613.
- Leung, A. K., Ng C. W. W. (2013) Seasonal movement and groundwater flow mechanism in an unsaturated saprolitic hillslope. *Landslides*, vol. 10(4):455–467.
- Lacerda, W. (1995) Engineering properties of regional soils: volcanic, residual and granular, X Congresso Pan-Americano de Mecânica de Solos e Fundações, *Anais v. 4*:133-160.
- Lacerda, Willy A. (2007) Landslide initiation in saprolite and colluvium in southern Brazil: Field and laboratory observations. *Geomorphology*, vol. 87, pp. 104–119.
- Valladares, C. S. et al. (2012). *Geologia e recursos minerais da folha Três Rios SF.23-Z-B-I: escala 1:100.000: estado do Rio de Janeiro*. Belo Horizonte: CPRM.