

Análise de uma Escavação de Grande Altura com Nível d'Água Elevado Considerando Fluxo Transiente

Jhonatan de Brito Tabajara
Engenheiro Geotécnico, Muniz & Spada Engenheiros Consultores, São Paulo, Brasil,
jhonatan@munizspada.com.br

Talytha Fonte Boa
Engenheira Geotécnica, Muniz & Spada Engenheiros Consultores, Campos dos Goytacazes, Brasil,
talytha@munizspada.com.br

Luiz Francisco da Silva Muniz
Engenheiro Geotécnico, Muniz & Spada Engenheiros Consultores, Rio de Janeiro, Brasil,
muniz@munizspada.com.br

Abdoul Aziz Diene
Engenheiro, Vale S.A., Brasília, Brasil, abdoul.diene@vale.com

Marianne Viviane Abreu
Engenheira Civil, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, mariannevabre@ime.eb.br

RESUMO: O presente trabalho apresenta um estudo conceitual para implantação de escavação em etapas para um corte profundo em caixão, para implantação de um trecho ferroviário, em maciço com nível d'água (NA) elevado. Em vista da presença crítica do NA elevado no maciço, foram realizadas análises de estabilidade, considerando-se redes de fluxo formadas pelos gradientes hidráulicos gerados entre as cotas do NA identificadas nas sondagens disponibilizadas (ajustadas ao histórico de chuvas da região) e as cotas de base em cada etapa da escavação. Os fatores de segurança mínimos foram obtidos por meio de modelagem numérica incorporando os efeitos das redes de fluxo transientes. As inclinações dos taludes foram estabelecidas a partir de análises de estabilidade, associando-se o controle do NA e das redes de fluxo no interior dos maciços para cada uma das etapas de escavação propostas. Em paralelo à definição das etapas sequenciais de escavação, foi prevista a instalação de baterias de Drenos Horizontais Profundos, garantindo a estabilidade durante as obras e a longo prazo. O objetivo dos estudos e análises reportados no presente artigo tiveram a função precípua de se assegurar que é possível a abertura do corte e a implantação da ferrovia com condições seguras, executando-se a obra em etapas, considerando-se as condições extremamente desfavoráveis existentes.

PALAVRAS-CHAVE: Escavação em etapas, fluxo transiente, DHPs, estabilidade de taludes.

ABSTRACT: This paper describes a conceptual study for a staged implementation of a deep through cut within, for the construction of a railroad segment, a massif characterized by high water level (HWL). Given the critical presence of the elevated water table, stability analyses were conducted, considering flow net formed by hydraulic gradients between water levels identified by boreholes (adjusted based on the region's rainfall history) and base levels at each excavation stage. Minimum safety factors were determined through numerical modeling incorporating the transient flow net effects. The slope inclinations were defined from stability analyses, associating the control of the water level control and flow net for each proposed excavation stage. Concurrently with the definition of sequential excavation stages, the installation of Horizontal Drains systems was planned to ensure stability during construction and in the long term. The objective of the studies and analyses reported in this article was primarily to ensure the feasibility of opening the cut and implementing the railway under secure conditions, executing the work in stages while considering extreme unfavorable conditions.

KEYWORDS: Staged excavation, transient flow, DHPs, slope stability.

1 INTRODUÇÃO

O artigo apresenta um estudo conceitual para implantação de escavação em etapas de um corte em caixão com extensão de cerca de 800 m, com altura máxima superior a 16 m, em maciço com nível d'água elevado, para implantação de um trecho ferroviário. Foram conduzidas análises de estabilidade, considerando-se a condição de fluxo transiente, avaliando-se o comportamento dinâmico das interações solo-água ao longo do tempo e a eficácia dos Drenos Horizontais Profundos (DHPs).

Os DHPs reduzem a magnitude das poropressões no interior de taludes e, conseqüentemente, aumentam as tensões efetivas do solo e o Fator de Segurança (FS). Os DHPs são construídos a partir de perfurações inclinadas de 3° a 10°, com comprimento variado, de modo que o escoamento gravitacional tenha eficiência satisfatória (Döbereiner e Vaz, 1998; Royster, 1980; GEORIO, 2000). A eficiência da drenagem horizontal está relacionada com as propriedades geotécnicas, a geometria do maciço, a quantidade, o espaçamento, o diâmetro e o comprimento dos drenos. (Nonveiller, 1981; Lau e Kenney, 1983; Martin *et. al.*, 1994; Cai e Ugai, 1999). Os DHPs, portanto, reduzem o nível freático interno do maciço, no qual a vazão escoada pelo dreno é proporcional ao gradiente hidráulico e a permeabilidade. O fluxo tende a diminuir à medida que se reduz o gradiente, saindo do regime transiente até reestabelecer a condição de regime permanente (GEORIO, 2000; Rahardjo *et. al.*, 2003; Putu Tantri e Indrasurya, 2023).

A NBR 11682:2009 determina o Fator de Segurança mínimo (FS_{\min}) para taludes, de acordo com a classificação que engloba o nível de segurança contra danos a vidas humanas, materiais e ambientais. O projeto estudado foi classificado como risco alto, tendo sido definido um FS_{\min} de 1,5 para os taludes definitivos.

2 DESCRIÇÃO DO TRECHO E INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS

O trecho estudado se encontra num domínio de rochas metamórficas de xistos, quartzitos, anfíbolitos e biotita-gnaisses. A camada superficial é constituída de uma unidade de latossolo vermelho-amarelo. Esses solos são típicos das regiões equatoriais e tropicais, ocorrendo também em zonas subtropicais, distribuídos, sobretudo, por amplas e antigas superfícies de erosão.

A abertura desses cortes será em uma região de relevo pouco dissecado, onde predomina o nível de erosão sustentado por solos de concreções lateríticas que, quando erodidos, se espalham pelas vertentes, onde solos eluvionares, coluvionares e residuais profundos apresentam texturas, em geral, silto-arenosas a areno-siltosas, compondo o material de 1ª categoria que perfaz grande parte das escavações.

Foi realizada uma campanha de investigações de campo, contemplando sondagens a trado, mistas e a percussão. Nos locais onde foram executadas as sondagens a trado foram também coletadas amostras para realização de ensaios de caracterização e granulometria. Foram conduzidos, também, ensaios triaxiais do tipo CU (*Consolidated Undrained*) para as profundidades de 3,0 m a 4,0 m e 6,0 m a 7,0 m.

3 DADOS GEOTÉCNICOS

Foi realizado um mapeamento geológico-geotécnico da superfície do terreno onde será implantada a ferrovia, com o objetivo de se determinar uma seção transversal crítica representativa para a avaliação da estabilidade dos taludes direito e esquerdo, em cada etapa de escavação, até se atingir o greide projetado. Foram conduzidas análises de estabilidade para a seção transversal adotada como a mais crítica, em função de sua maior profundidade de escavação (aproximadamente, 16,60 m) e do NA mais elevado. A seção transversal geológico-geotécnica foi esquematizada com base nas informações obtidas a partir do levantamento topográfico e na inferência da estratigrafia dos perfis de sondagem.

Tendo em vista a presença crítica do NA elevado no maciço, foram realizadas análises de estabilidade, considerando-se redes de fluxo formadas pelos gradientes hidráulicos gerados entre as cotas do NA identificadas nas sondagens (ajustadas ao histórico de chuvas da região) e as cotas de base em cada etapa da escavação.

Os fatores de segurança mínimos foram obtidos por meio do método de Spencer, utilizando-se o programa Slide2, da Empresa Rocscience, baseado em modelagem que incorpora os efeitos transientes da rede de fluxo considerada.

3.1 Estratigrafia do Maciço

3.1.1 Perfil longitudinal do corte

Apresenta-se na Figura 1, o perfil longitudinal do corte estudado, inferindo o NA a partir da campanha de investigações realizada neste trecho.

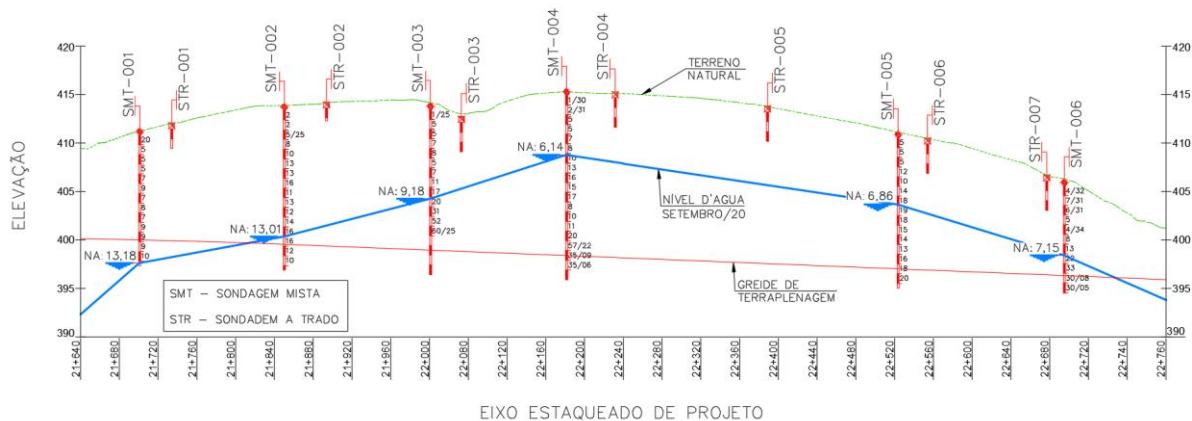


Figura 1. Perfil longitudinal do corte estudado.

3.1.2 Seção geológico-geotécnica adotada

Elaborou-se uma seção geológico-geotécnica (ver Figura 2), inferida a partir das sondagens, e incorporando-se as informações de granulometria e grau de intemperismo, identificados a partir dos boletins das sondagens e das amostras colhidas.

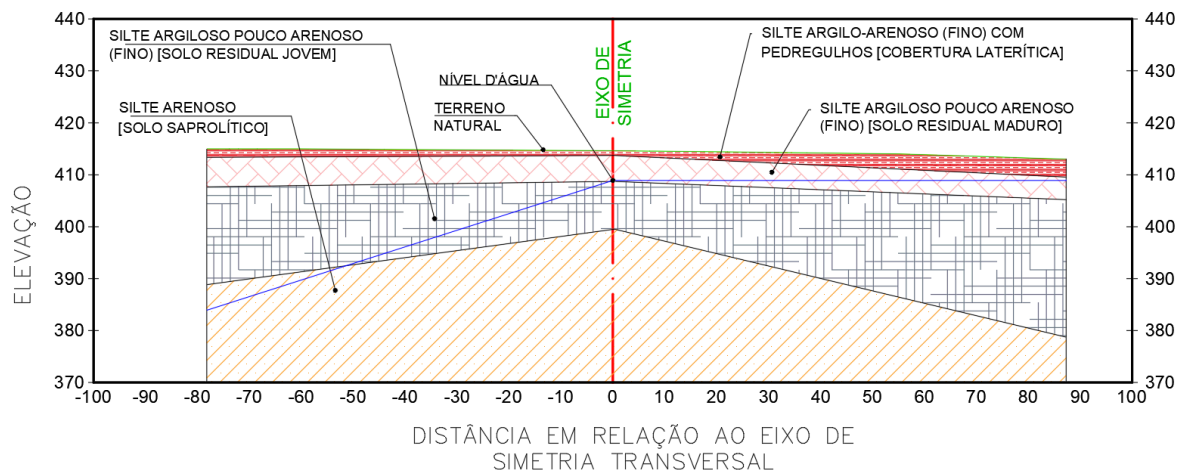


Figura 2. Seção geológico-geotécnica inferida.

Foi identificada nas camadas mais superficiais, a formação de nódulos lateríticos que conferem uma elevada resistência à penetração nas sondagens a percussão. Subjacente, ocorre uma camada de solo residual maduro, que ainda exhibe sinais do processo de formação laterítica, revelado pelo tom avermelhado, mas com resistência mais baixa, com valores de penetração N_{SPT} variando de 1 a 8 golpes. Na sequência, em profundidade, aparece um estrato de solo residual jovem, em cor cinza escuro, sobrejacente ao maciço saprolítico.

3.2 Parâmetros Geotécnicos

Para atribuição dos parâmetros geotécnicos, levaram-se em consideração os resultados dos ensaios disponibilizados, conjugando-se com a experiência dos técnicos envolvidos. Abaixo do NA, foi considerada ainda uma redução da parcela de sucção matricial de resistência ao cisalhamento, por efeito de submersão das camadas. A Tabela 1 apresenta os parâmetros geotécnicos adotados nas análises de estabilidade. Vale ressaltar-se que os parâmetros de resistência ao cisalhamento adotados foram ajustados para condições julgadas mais críticas. Foram utilizados valores típicos de permeabilidade apresentados na bibliografia, em função das matrizes granulométricas das camadas.

Para cada material, adotaram-se as curvas-padrão de Permeabilidade x Sucção e de Teor de umidade x Sucção (curva característica) disponibilizadas pelo programa de análise.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos adotados nas análises de estabilidade.

CAMADA		N _{SPT}	k _v = k _h (cm/s)	γ _n (kN/m ³)	Acima	Abaixo	φ' (°)
Gênese	Granulometria				do NA c' (kPa)	do NA c' (kPa)	
Cobertura laterítica	Silte argilo-arenoso (fino) com pedregulhos	11-16	10 ⁻⁵	19	15	10	30
Residual Maduro	Silte argiloso pouco arenoso (fino)	1-8	10 ⁻⁶	17	10	5	22
Residual Jovem	Silte argiloso pouco arenoso (fino)	5-26	10 ⁻⁶	20	20	15	27
Saprolítica	Silte arenoso	>60	10 ⁻⁵	20	15	10	35

3.3 Considerações Sobre o Nível d'água

As profundidades do NA indicadas nas sondagens não se referem aos períodos chuvosos mais críticos da região. Por meio dos dados pluviométricos disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), verifica-se que o período de maiores volumes de chuva ocorre nos meses de janeiro, fevereiro e março. Considerou-se que o nível d'água apresentado nas sondagens não representaria a condição mais severa. Dessa forma, assumiu-se uma nova posição mais elevada para o NA, arbitrariamente, a favor da segurança (ver Figura 3).

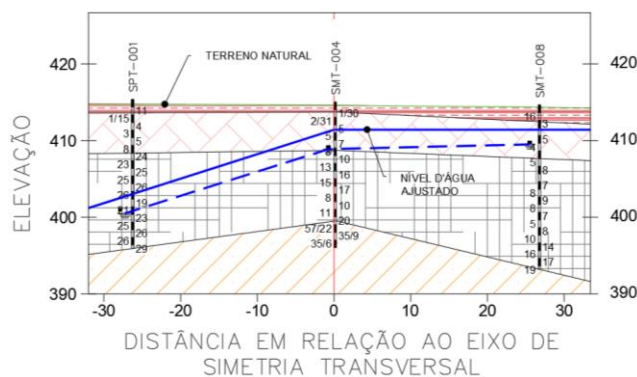


Figura 3. NA arbitrado para condição mais crítica de simulação da seção transversal.

4 ETAPAS DE ESCAVAÇÃO

O conceito adotado se baseou na busca de fatores de segurança mínimos de 1,50, avaliando-se as inclinações dos taludes, associando-se ao controle do NA e das redes de fluxo no interior dos maciços para cada uma das etapas propostas. Deve ser ainda levado em conta o fato de que as análises realizadas não consideraram a condição de tridimensionalidade dos fluxos e do estado de tensão x deformação, mais próximos

da realidade, que confeririam valores de fatores de segurança mínimos superiores aos calculados. Foi prevista a implantação de uma bateria de DHPs com a inclinação de 3° no plano vertical (ver Figura 4), esconsos em relação ao eixo da ferrovia, com comprimentos variados. A esconsidade dos DHPs permitirá drenar as frentes de escavação facilitando o avanço dos equipamentos.

Seguem-se as etapas:

- A primeira etapa proposta consistiu na escavação de 4 m de altura, adotando-se taludes com inclinações de 1:2 (V:H) do lado direito e 1:1,5 (V:H) para o lado esquerdo da seção (ver Figura 4(a)). Propõe-se a instalação de um nível de DHPs, com comprimento de cerca de 30 m em planta, de modo a preservar um afastamento transversal do NA da face do talude em torno de 15 m. Para essa primeira etapa, o FS_{\min} encontrado para o lado direito foi de 1,33 e para o lado esquerdo de 1,89 (ver Figura 5(a)). Após a instalação dos DHPs, no lado direito, a análise considerando fluxo transiente redundou em um incremento de fator de segurança de 1,33 para 1,50 (ver Figura 5(b)).
- A segunda etapa indicada consiste em avançar a escavação até uma profundidade de cerca 8,6 m, mantendo-se a inclinação do talude em 1:1,5 (V:H) no lado esquerdo (ver Figura 4(b)). Para o lado direito, o talude deverá ser aprofundado, completando-se a altura de 8,6 m, intermediada por uma banquetta de 4,40 m de largura, separando-se dois taludes com inclinação 1:2 (V:H). Os DHPs nesta etapa deverão ser cortados, reduzindo-se o seu comprimento para cerca de 15 m. Ainda nessa segunda etapa, propôs-se a instalação de um nível de DHPs, com comprimentos de cerca de 40 m em planta, de modo a ensejar um afastamento transversal do NA da face do talude em torno de 20 m. Para essa segunda etapa, o FS_{\min} encontrado para o lado direito foi de 1,40 e para o lado esquerdo de 1,67 (ver Figura 5(c)). Após a instalação dos DHPs, no lado direito, a análise considerando fluxo transiente redundou em um incremento de fator de segurança de 1,40 para 1,77 (ver Figura 5(d)).
- A terceira etapa de escavação avança, aprofundando-se mais 6,0 m, mantendo-se a inclinação de 1:1,5 (V:H), para o lado esquerdo, alcançando-se uma profundidade total de cerca de 14,60 m (ver Figura 4(c)). Para o lado direito, manteve-se o talude de 1:2 (V:H). Ainda nessa terceira etapa, foi proposta a instalação de um nível de DHPs, com comprimentos de cerca de 40 m em planta, de modo a se ter um afastamento transversal estimado do NA da face do talude em torno de 20 m. Para essa terceira etapa, o FS_{\min} encontrado para o lado direito foi de 1,48 e para o lado esquerdo de 1,50 (ver Figura 5(e)). Após a instalação dos DHPs, nos lados direito e esquerdo, a análise considerando fluxo transiente redundou em um incremento de fator de segurança de 1,48 para 1,60 para o lado direito, e de 1,50 para 1,72 para o lado esquerdo (ver Figura 5(f)). A implantação da bateria de drenos no lado esquerdo e direito permitirá o avanço das escavações para as etapas seguintes, mantendo-se fatores de segurança mínimos adequados.
- Finalizando com a quarta etapa, segue-se com avanço da escavação até o greide de projeto na largura prevista para a plataforma ferroviária, mantendo-se a inclinação do talude em 1:1,5 (V:H) (ver Figura 4(d)). Para o lado direito, a escavação deverá manter a inclinação do talude em 1:2 (V:H). Para essa segunda etapa, o FS_{\min} encontrado para o lado direito foi de 1,54 e para o lado esquerdo de 1,62 (ver Figura 5(g)).

A Tabela 2 apresenta um resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade, para os taludes direito e esquerdo. A Figura 6. mostra a evolução dos fatores de segurança com o fluxo transiente induzido pelos DHPs para as etapas de escavação, para o talude esquerdo (ver Figura 6 (a)) e direito (ver Figura 6 (b)).

Tabela 2. Fatores de segurança obtidos, por etapa, nas análises de estabilidade, para os taludes direito e esquerdo, antes e após a instalação dos DHPs.

Etapa	FS – LD		FS – LE	
	antes da instalação dos DHPs	após a instalação dos DHPs	antes da instalação dos DHPs	após a instalação dos DHPs
1	1,33	1,50	1,89	1,89
2	1,40	1,77	1,67	1,67
3	1,48	1,60	1,50	1,72
4	1,54	-	1,62	-

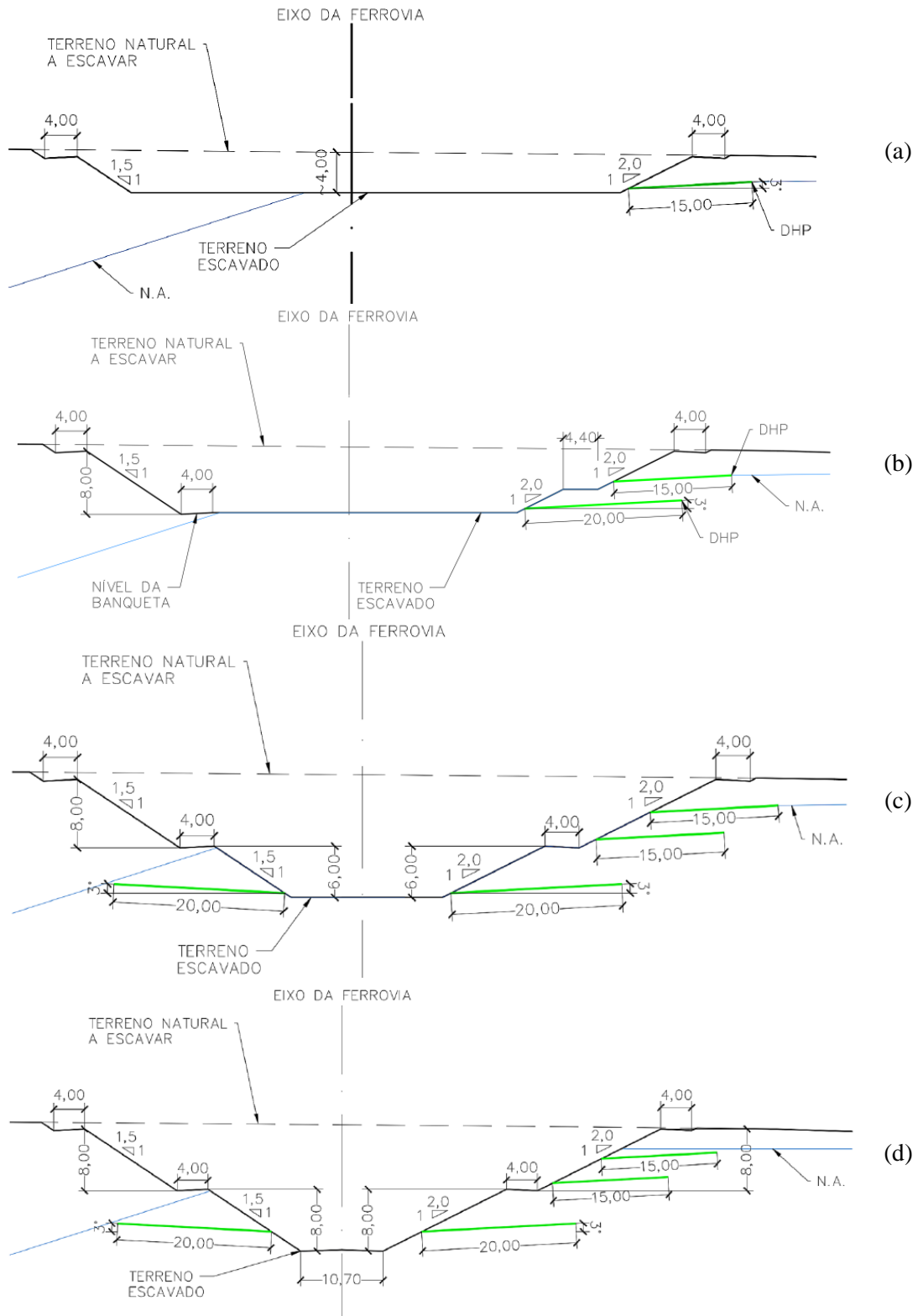


Figura 4. (a) Primeira etapa de escavação; (b) segunda etapa de escavação; (c) terceira etapa de escavação e (d) quarta etapa de escavação.

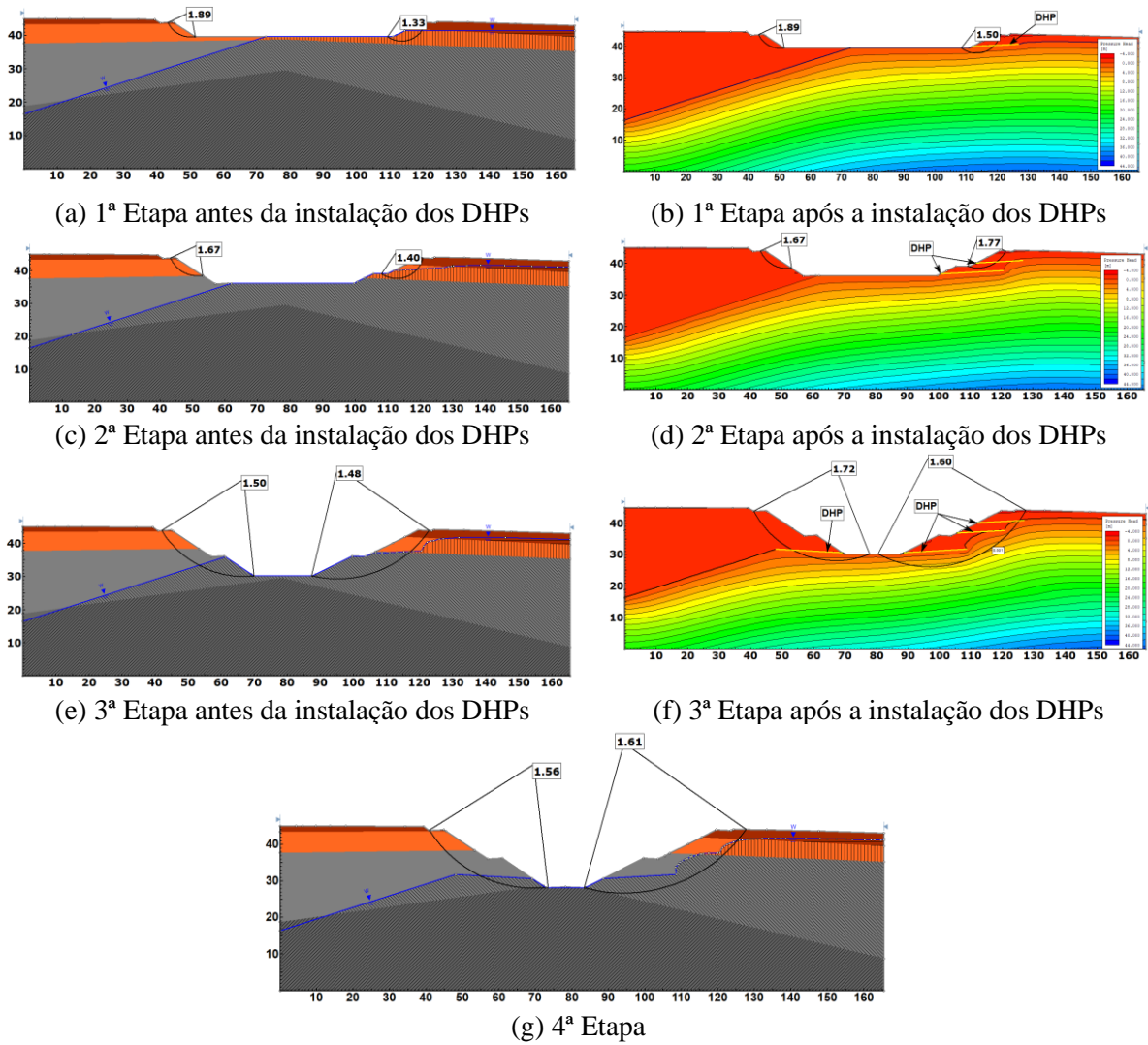


Figura 5. Resultado das análises de estabilidade antes e após a instalação dos DHPs

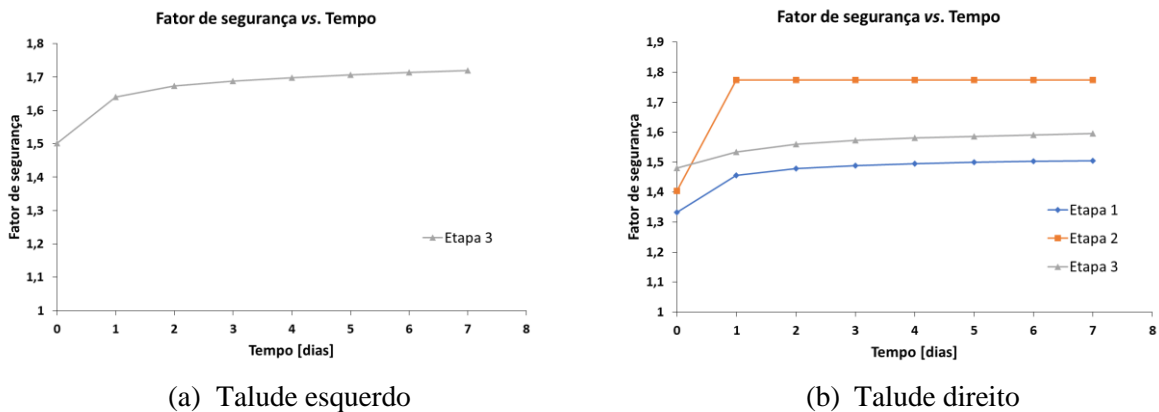


Figura 6. Incremento do FS com a estimativa de tempo após a instalação das linhas de DHPs nas etapas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

O objetivo do trabalho foi desenvolver uma metodologia conceitual para fundamentação de uma sequência executiva segura de escavação para cortes altos, com a presença de NA elevado, em um projeto de implantação de uma ferrovia.

A par das etapas sequenciais de escavação, foi prevista a instalação de baterias de DHPs esconsas ao eixo da ferrovia, para garantia de estabilidade durante as obras e a longo prazo. A esconsidade dos DHPs permitirá drenar as frentes de escavação facilitando o avanço dos equipamentos.

É importante ressaltar-se que a abordagem adotada para definição dos modelos de análise não levou em consideração o efeito da tridimensionalidade do fluxo durante a execução das escavações, o que redundou em um cenário conservador em toda a sua extensão.

Adicionalmente, não foram consideradas nas análises, o caráter tridimensional do estado de tensões que irá favorecer a formação de arqueamento na frente de escavação, permitindo-se supor níveis de segurança superiores aos indicados nas análises de estabilidade.

Considera-se que o objetivo dos estudos e análises reportados no presente trabalho tiveram a função precípua de se assegurar que é possível a abertura do corte e a implantação da ferrovia no trecho estudado, com condições seguras, executando-se a obra em etapas, considerando-se condições de contorno extremamente desfavoráveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Engenheiro Abdoul Azis Diene pela confiança e disponibilização dos dados para elaboração deste artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de taludes*. Rio de Janeiro.
- Cai, F & Ugai, K. (1999). Effects of Horizontal Drains on Groundwater level and Slope Stability. *Slope Stability Engineering*, Balkema, Rotterdam, p. 551-556.
- Döbereiner, L.; Vaz, L. F. (1998). *Tratamento de Maciços Naturais*. OLIVEIRA, A. M. S.; Brito, S. N. A. (eds) – Geologia de Engenharia. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, ABGE, São Paulo, p. 361-380.
- GEORIO, (2000). *Manual Técnico de Encostas*. Volume I. Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Lau, K.C., Kenney, T.C. (1983). Horizontal drains to stabilize clay slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, v.21, p. 241 – 249.
- Martin, R.P., Siu, K.L., Premchitt, J. (1994). *Review of the performance of horizontal drains in Hong Kong*. Special Project Report, SPR 11/94, Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department, Hong Kong, p. 106.
- Nonveiller, E. (1981). Effective of horizontal drains on slope stability. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 10º, Stockholm, Balkema, Rotterdam, v. 3, p 495-500.
- Putu Tantri K. S., Indrasurya B. M. (2023). Effect of Horizontal Drain for Slope Stability During Rainfall Using Transient Seepage Analysis. *Civil Engineering and Architecture*, 11(5), 2753 - 2767.
- Rahardjo, H.; Hritzuk, K.J.; Leong, E.C.; Rezaur, R.B. (2003). Effectiveness of Horizontal Drains for Slope Stability. *Eng. Geol.* 69, p. 295–308.
- Royster, D.L. (1980). *Horizontal drains and horizontal drilling: an overview*, Transportation Research Record 783, 16-25.