XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/72

Estabilização do Aterro do km 63 da Rodovia Fernão Dias

Werner Bilfinger
Engenheiro, Vecttor Projetos Ltda., São Paulo, Brasil, werner@vecttor.com.br

Danielle Mie Kawamura
Engenheira, Vecttor Projetos Ltda., São Paulo, Brasil, danielle@vecttor.com.br

Bruno Szpigel Dzialoszynski
Engenheiro, Vecttor Projetos Ltda., São Paulo, Brasil, bruno@vecttor.com.br

Clara Naoko Takaki
Engenheira, Vecttor Projetos Ltda., São Paulo, Brasil, clara@vecttor.com.br

RESUMO: O artigo apresenta o caso de obra de estabilização de contenção e talude em aterro construídos na altura do km 63/SP da duplicação da Rodovia Fernão Dias, na região de Mairiporã. A obra original incluía cortina atirantada em maciço de aterro em seção de meia encosta que, após alguns anos, mostrou sinais de movimentação, e levou à implantação de um reforço, com tirantes adicionais, terraplenagem e fundação em estacas tipo raiz. Novos sinais de movimentação levaram à implementação de medidas de estabilização emergenciais, incluindo rebaixamento do lençol freático com poços profundos, e o desenvolvimento e implementação de solução de estabilização robusta. O artigo apresenta a evolução do modelo geológico-geotécnico, resultados das campanhas de investigação, das retroanálises realizadas e a solução de estabilização implantada com sucesso. Inclui resultados de instrumentação, com marcos superficiais, indicadores de nível de água, piezômetros e inclinômetros.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Taludes; Contenção; Cortina atirantada; Aterro.

ABSTRACT: The paper presents a case study of a retaining structure and embankment slope stabilization project carried out at km 63 of Highway SP-063 (Fernão Dias Highway), in the Mairiporã region. The original works included an embankment and an anchored retaining structure which, after a few years, showed signs of movement, leading to the implementation of a reinforcement intervention with additional anchors and root pile foundations. Further signs of movement subsequently required the implementation of emergency stabilization measures, including groundwater lowering using deep wells, as well as the development and construction of a robust stabilization solution. The paper describes the evolution of the geological–geotechnical model, the results of the site investigation campaigns and back-analyses performed, and the stabilization solution successfully implemented. It also includes monitoring results including superficial displacements, water level indicators, piezometers, and inclinometers.

KEYWORDS: Slope Stability; Retaining structure; Anchored retaining structure; Embankment.

1. INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta o histórico da obra de estabilização do km 63 da Rodovia Fernão Dias, próximo a Mairiporã, São Paulo. Desde a duplicação da rodovia, finalizada em 2002, o local vinha sofrendo movimentações significativas, tendo sido objeto de obras de reforço da contenção inicialmente construída no local. Novas movimentações levaram à necessidade de obras de emergência, para evitar a interrupção da rodovia, e implantação de solução definitiva mais robusta. O artigo apresenta o histórico do local, a evolução do modelo geológico-geotécnico, resultados das campanhas de investigação, das retroanálises realizadas e a solução de estabilização implantada. Incluem-se também resultados de instrumentação, com marcos superficiais, indicadores de nível de água, piezômetros e inclinômetros.

2. HISTÓRICO DO LOCAL

Em 1961 a rodovia foi inaugurada em pista simples. De 1990 a 2002 a rodovia foi duplicada, mantendo-se em grande parte o traçado. A duplicação foi realizada através de aumento de cortes e aterros. Na região da instabilização ora discutida a duplicação envolveu a implantação de uma cortina atirantada.

No período chuvoso de 2009/2010 foi observada a ocorrência de trincas e movimentações na pista, além de deformações na cortina atirantada (ver Figura 1(a)), levando à implantação de instrumentação, realização de investigações geotécnicas e ao desenvolvimento de projeto de reforço da cortina atirantada, implantado entre 2012 e 2013, que incluiu tirantes adicionais e reforço da fundação do paramento em estaca raiz, apoiadas em rocha / solo de alteração. Também foi executado reaterro com bermas intermediárias e instalados drenos horizontais profundos (DHPs) ao longo do talude de jusante.

Após alguns anos de operação, foram detectadas novas movimentações, ilustradas na Figura 1(b); o mapeamento de trincas associado é ilustrado na Figura 2. As movimentações levaram à realização de medidas emergenciais no período chuvoso de 2016/2017, incluindo rebaixamento emergencial do lençol freático com poços profundos e instalação de DHPs longos no pé do talude, adequação da drenagem superficial, realização de testes e alívio em alguns tirantes na cortina atirantada e instalação de instrumentação adicional. Em paralelo foi realizada campanha de investigações complementar através de sondagens mistas.



(a) (b)

Figura 1 – Fotografias do histórico de movimentações. (a) Foto de trincas na pista em maio de 2010. (b) Foto da base da contenção 09/2016, notar “descolamento” da canaleta.

As investigações adicionais e o monitoramento realizados nesse período apoiaram o diagnóstico da instabilização, a concepção do projeto e as obras de estabilização descritas neste artigo, que foram implantadas entre 2018 e 2019.

3. GEOLOGIA LOCAL E EVOLUÇÃO DO CONHECIMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

O subsolo do local da obra consiste de aterros sobrepostos a um perfil de alteração de solo de alteração de granito milonitizado. Localmente foi identificado colúvio e aluvião entre o aterro e o solo de alteração, principalmente na porção mais central do talude. Regionalmente, a obra se localiza na encosta da margem direita do rio Juqueri na borda de corpo de Granito Mairiporã, com ocorrência de falhamento paralelo ao rio Juqueri (CPRM, 2019).

Ao longo do histórico descrito de movimentações e instabilizações, foram realizadas algumas campanhas de investigação geológico-geotécnicas, resumidas na Figura 2, que também apresenta o mapeamento de trincas e instabilizações superficiais em 2016/2017.

Baseado nas campanhas de investigação foi possível estabelecer um modelo geológico-geotécnico do local, ilustrado em seção transversal na Figura 3. A figura também ilustra o diagnóstico e a retroanálise da instabilização discutidos adiante.

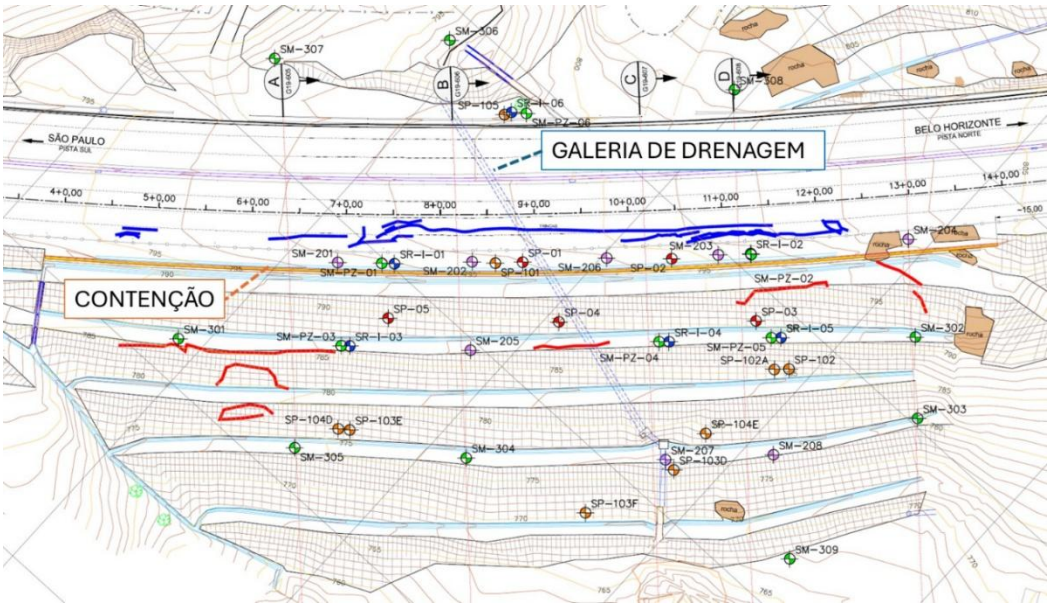


Figura 2 – Locação das investigações geológico-geotécnicas e mapeamento de trincas (azul) e escorregamentos superficiais (vermelho) em 2016/2017.

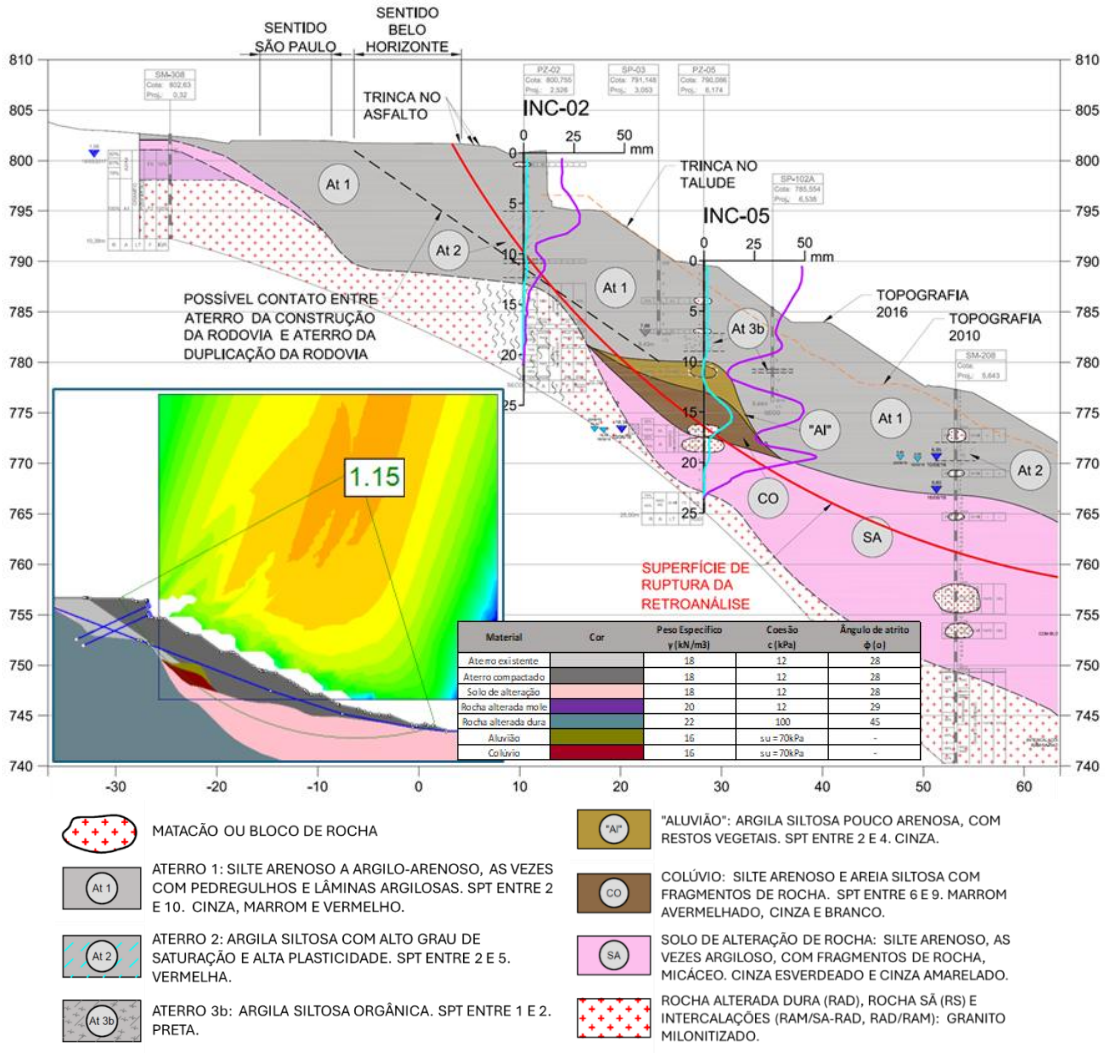


Figura 3 – Seção geológico-geotécnica típica e interpretação de superfície de ruptura segundo leituras de 2 inclinômetros (a montante e a jusante da contenção existente) e retroanálise.

O aterro existente foi construído em diversas épocas e etapas, com diversos tipos de controle e material, mostrando variabilidade de natureza e compacidade. O material predominante é um silte argilo-arenoso / areno-argiloso, com índices N_{SPT} de 2 a 10. Contudo, foram identificadas zonas com pedregulhos e zonas maiores de aterro em argila de alta plasticidade, e, localmente, até argila orgânica muito mole. Os aterros estão apoiados diretamente sobre a rocha do embasamento ou em solo residual. Também identificou-se, localmente, colúvio e aluviões associados a um antigo talvegue local, sobre o qual o aterro foi construído.

As investigações e avaliações realizadas indicaram que o fluxo d'água no maciço ocorre de forma complexa, condicionada por caminhos e direções preferenciais de percolação associados a estruturas geológicas e a heterogeneidades do aterro.

A posição do topo rochoso de granito milonitizado é variável, chegando a 6m de desnível entre sondagens distantes 3m, em possível associação a estruturas geológicas, bem como processos de alteração particulares. De forma semelhante, os índices N_{SPT} medidos no solo de alteração não mostram tendência sistemática de crescimento com a profundidade, chegando a ocorrer trechos onde foi atingido impenetrável sucedidos por trechos com baixos índices N_{SPT}.

Ocorre a presença de matacões de dimensão variável, de decímetros, até ~5m, tanto no corpo de aterro – provavelmente lançados sem controle durante sua execução – quanto no solo de alteração.

Perdas d'água em sondagens e consumos de material de pré-filtro em poços emergenciais indicaram a provável presença de vazios no contato do solo de alteração com o topo rochoso, e nas "bordas" dos matacões. Tais vazios foram interpretados como associados a caminhos preferenciais de fluxo, com energia suficiente para transportar material.

4. DIAGNÓSTICO DOS MECANISMOS DE INSTABILIZAÇÃO

A Figura 3 ilustra a interpretação das deformações em seção geológico-geotécnica representativa, com base em leituras de dois inclinômetros, um a montante e outro a jusante da contenção existente; no canto inferior é apresentado exemplo de uma das retroanálises realizadas, para a mesma seção.

O mecanismo de instabilização se manifestou em superfície como movimentações na cortina atirantada existente, na canaleta no pé da cortina, bem como trincas na pista e no talude. As trincas na pista se distribuíam de forma praticamente contínua na pista, a montante da cortina atirantada existente, (ver Figura 2) sugerindo uma movimentação global, de maior proporção. As trincas no talude apresentavam distribuição heterogênea e descontínua, sugerindo movimentações locais, ou secundárias.

Como ilustrado na Figura 3, a jusante da contenção observavam-se oscilações ao longo do perfil de deslocamentos ao longo da profundidade do INC-5 em padrão pouco usual, e diferente do INC-2. O inclinômetro INC-5 apresentava pouco embutimento em rocha (em "material indeslocável"), dificultando a sua interpretação. Considerando o modelo geológico e o conjunto dos instrumentos, interpretou-se região de concentração de deslocamentos a profundidades de cerca de 19m. A região na qual foram identificados deslocamentos não se limitou aos aterros existentes, mas também envolveu o solo residual subjacente.

Com base em tais avaliações foi inferida uma geometria potencial para a superfície de escorregamento da instabilização. Foram realizadas retroanálise a partir de análises de equilíbrio limite com auxílio do software Slide 6 (Rocscience, 2026), buscando reproduzir superfície de escorregamento compatível com tal cinemática. Como a instabilidade se caracterizou por movimentações progressivas e não por ruína completa, foi assumido que o fator de segurança do talude estaria entre 1,0 e 1,2. As análises de estabilidade foram realizadas considerando superfícies potenciais de ruptura circulares e não circulares, utilizando o método de Spencer, para diversas seções geológico-geotécnicas (na Figura 3 é ilustrado um exemplo).

5. SOLUÇÃO DE ESTABILIZAÇÃO

Devido às significativas complexidades associadas ao maciço instabilizado, foi concebida uma solução que buscou cobrir as incertezas e possíveis mecanismos existentes de forma robusta, incluindo a introdução de elementos ativos de reforço próximos à crista, remoção de massa ativa do talude por terraplenagem, rebaixamento / controle do nível d'água com drenagem profunda, injeções com calda de cimento, e melhorias na drenagem superficial, conforme ilustrado na Figura 4.

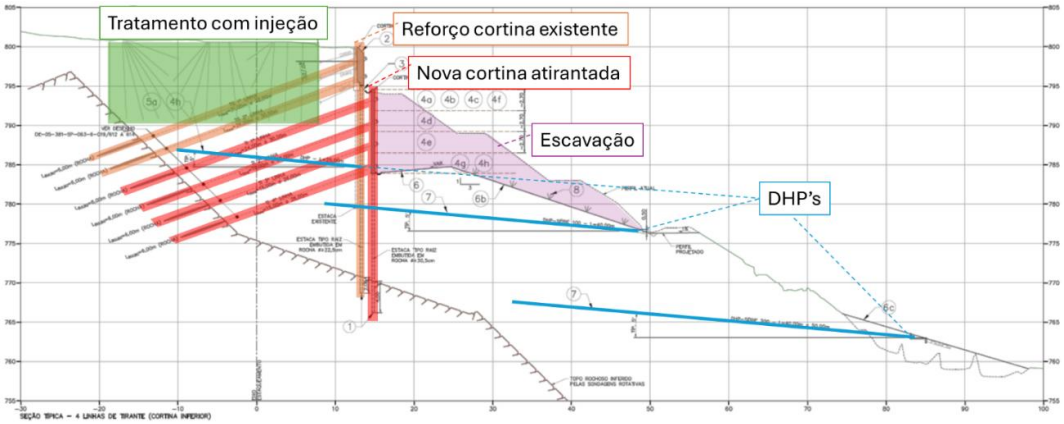


Figura 4 – Seção típica esquemática da solução de estabilização implantada.

A solução de contenção incluiu o reforço da cortina atirantada existente – Cortina Superior - com 2 linhas de tirantes, integrados por meio de contrafortes e novas fundações em estaca raiz embutidas em rocha. Foi implementada uma nova cortina atirantada – Cortina Inferior - com 8m a 10m de altura e 3 a 4 linhas de tirantes, com cargas entre 650kN e 850kN, respectivamente, com espaçamento de cerca de 2,5m na horizontal.

A Cortina Inferior foi implementada em escavação próxima ao pé da Cortina Superior, viabilizando a terraplenagem para redução da massa ativa do talude. A fundação desta cortina consiste também de estacas raiz embutidas em rocha. A Figura 5 apresenta fotos da obra e contenção finalizada.



(a) (b)

Figura 5 – Fotos da contenção. (a) Cortina Superior com reforço com contrafortes em execução e (b) Contenção finalizada, incluindo Cortina Superior e Cortina Inferior.

Também foi reforçado o sistema de drenagem profunda, com instalação e recuperação de DHPs nas cortinas e ao longo do talude. Os DHPs foram instalados com comprimentos de 25m até 50m, e após os trabalhos de injeção descritos adiante, para garantir sua integridade. Complementarmente, foram implementadas melhorias na drenagem superficial, com recuperação de dispositivos existentes e implantação de novas descidas hidráulicas e caixas de dissipação.

Como ação complementar, foi executado tratamento com injeções de calda de cimento sob toda a pista de rolamento, para o preenchimento de vazios existentes / eventualmente existentes no subsolo sob rodovia, visando mitigar riscos de subsidências e recalques. As injeções foram realizadas em 2 fases, com um total de 10m de profundidade. A 1ª fase foi executada nos 5m superiores, com pressão máxima equivalente ao peso próprio da coluna. A 2ª fase foi executada de baixo para cima, com pressão máxima definida por furos exploratórios. A execução das injeções foi realizada com controle de volume e pressão, além de inspeção de DHPs, talude e de galeria de drenagem em tubo ARMCO revestido existente no local.

O efeito estabilizante da solução no talude foi verificado com base em análises e estabilidade por equilíbrio limite segundo superfícies críticas locais e globais. Os fatores de segurança mínimos foram definidos

de forma específica para diferentes superfícies críticas em função de envolverem a pista de rolamento, ou moradias a jusante do talude, com base na norma NBR 11682 (ABNT, 2009).

Foram realizadas análises de período construtivo considerando as contribuições do rebaixamento emergencial com poços de bombeamento. Para as análises da condição definitiva / de longo prazo tal contribuição foi desprezada, e foi levado em conta apenas o efeito dos DHPs. A Figura 6 exemplifica os resultados obtidos, para uma das análises realizadas, na mesma seção da retroanálise ilustrada na Figura 3

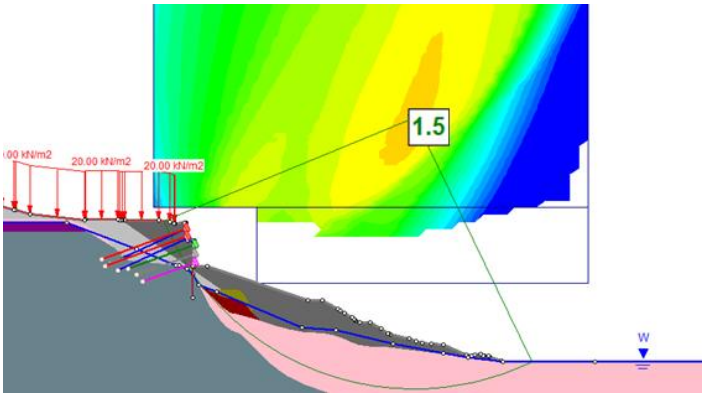


Figura 6 – Exemplo de análise de estabilidade para verificação do projeto.

Os comprimentos de ancoragem dos tirantes em solo foram estimados com base em Habib (1989) e Dias e Yassuda (1996), e em rocha com base em prescrições da NBR 5629 (ABNT, 2006), vigente à época. Os comprimentos foram posteriormente confirmados pelos ensaios de recebimento.

As fundações da cortina em estaca raiz embutida em rocha foram dimensionadas utilizando metodologias de cálculo de estacas em rocha conforme metodologia proposta na AASHTO (2002) e atendendo a NBR 6122 (ABNT, 2010). Face às incertezas associadas ao maciço rochoso local, foi considerada apenas a contribuição do atrito lateral em rocha para a capacidade de carga, desprezando a ponta e o atrito em solo.

6. INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO

A Figura 7 apresenta a locação da instrumentação comentada e de DHPs com vazão monitorada. A instrumentação completa da contenção foi omitida para facilitar a visualização dos instrumentos ora discutidos.

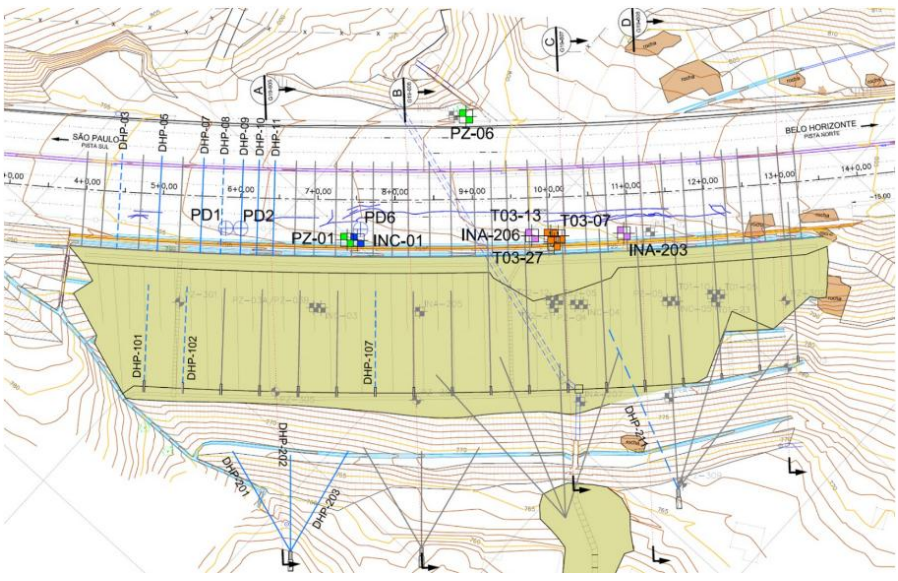


Figura 7 – Locação da instrumentação comentada e de DHPs com vazão monitorada sobre implantação.

A instrumentação no período emergencial e pré-obra, antes da execução do(s) reforço(s) propriamente dito consistiu em inclinômetros, tassômetros, pinos e marcos superficiais, indicadores de nível d'água e piezômetros. A Figura 8 mostra leituras de tassômetros, piezômetro e indicadores de nível d'água antes da execução das obras do reforço propriamente dito.

Conforme ilustrado, com relação ao período de ações emergenciais, nota-se que a instrumentação mostrou durante o período chuvoso (01/2017) uma indicação de deslocamentos abruptos, da qual interpretou-se que os DHPs longos e poços drenantes ("poços de infiltração para camadas profundas drenantes") executados não foram suficientes para a redução da velocidade de deslocamentos, sendo então definidos poços de rebaixamento com bombas a montante de todo o talude. Os poços iniciaram sua operação em 30/01/2017, para enfrentar o período chuvoso. Essa ação foi primordial para a manutenção da operação da rodovia em meia pista (Pista Norte). Cabe observar que ao menos nos piezômetros instalados, o rebaixamento promovido pelos poços instalados não foi detectado de forma significativa em escala localizada, mas o monitoramento de deslocamentos ao longo do tempo indicou eficácia nas ações de drenagem profundas realizadas em nível global, reforçando a interpretação de uma hidrogeologia complexa.

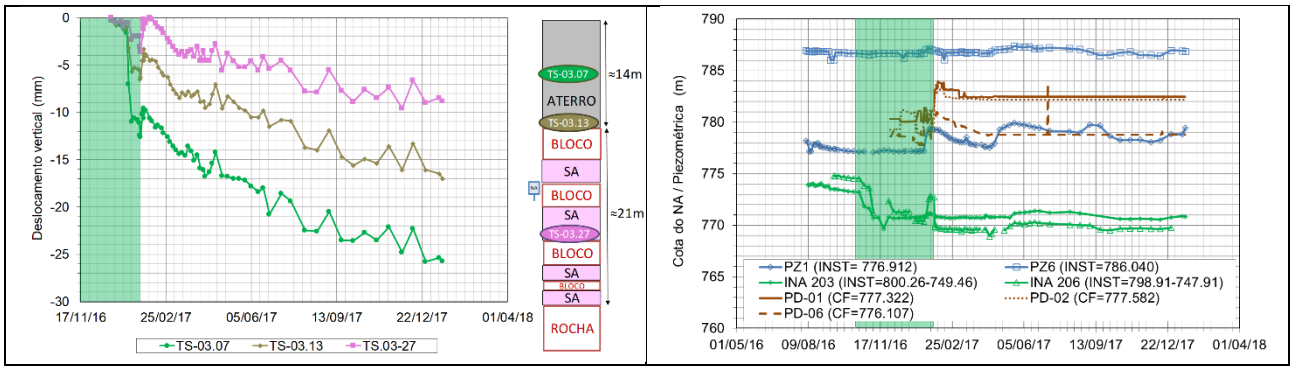


Figura 8 – Leituras de tassômetros e piezômetros / indicadores de nível d'água a montante da cortina superior. Período de implementação das ações emergenciais destacado em verde.

Referente ao período pós-obras, na Figura 9 apresentam-se o histórico de leitura do inclinômetro INC-1, remanescente dos instrumentos instalados antes das obras, em 2016, e na Figura 10 apresenta-se o histórico das leituras de vazão dos DHPs, iniciadas após o desligamento dos poços de bombeamento no final de setembro de 2019. Nota-se no controle das vazões resposta frente aos períodos chuvosos associada a DHPs localizados do lado esquerdo da contenção, em cotas mais baixas do greide da via em comparação ao lado direito.

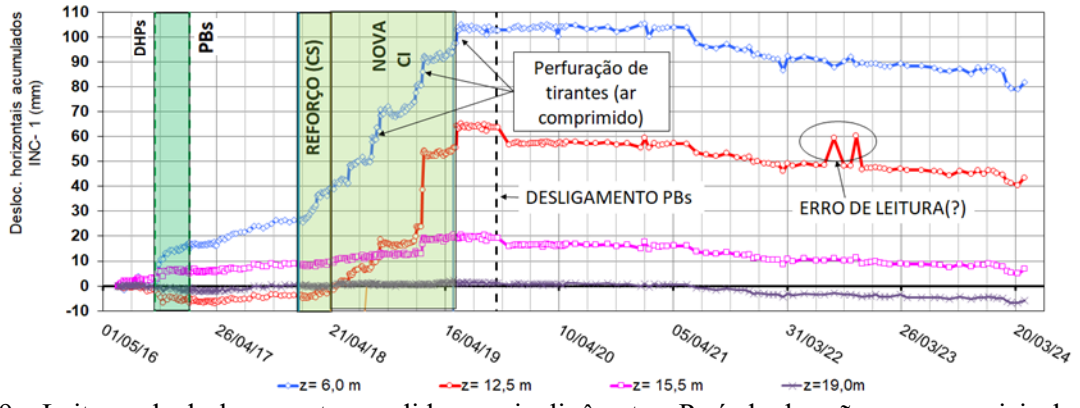


Figura 9 – Leituras de deslocamentos medidos por inclinômetro. Período de ações emergenciais destacado em verde escuro e período de reforço da Cortina Inferior e implantação da Cortina Superior em verde claro. Notar aceleração de deslocamentos durante perfuração de tirantes próximos.

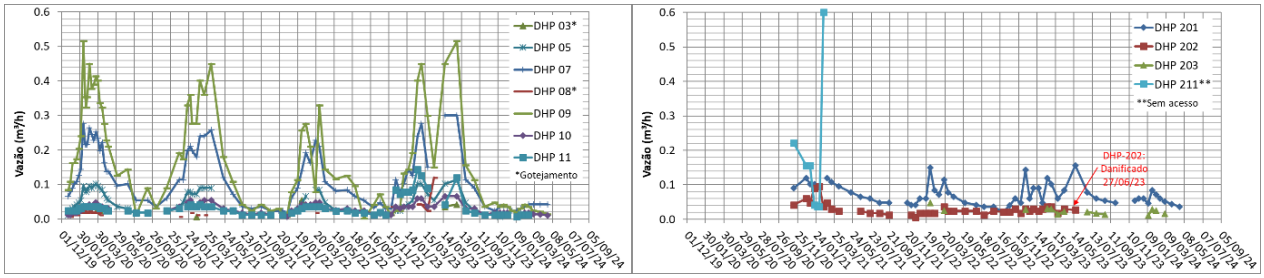


Figura 10 – Monitoramento de vazões dos DHPs no período pós-obras.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A instrumentação desde o início do evento serviu de balizamento para a concepção do projeto de reforço, apontando para a necessidade de implementação de solução robusta na região da instabilidade observada. O período de acompanhamento durante e após a execução do reforço projetado ratifica a integridade das estruturas projetadas e a complexidade do subsolo e da hidrogeologia local na interface dos aterros antigos e solos naturais, no trecho superior do talude/contenção.

Inspeções periódicas e operações de manutenção dos taludes, incluindo manutenções no sistema de monitoramento e nos dispositivos de drenagem instalados, evitando perdas no histórico de leituras, mostraram-se de grande valia para acompanhamento, tomada de decisão e garantia de vida útil da obra, reiterando a importância deste tipo de ação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Arteris Autopista Fernão Dias, em especial ao Eng. Sergio Asakawa (in memoriam), pelo apoio e pela possibilidade de publicação deste trabalho. Agradecem, também, aos Professores Luiz Guilherme de Mello e Claudio M. Wolle pelo incentivo à sua elaboração. Finalmente, agradecem à equipe técnica da Vecttor Projetos pelo apoio prestado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2006): *NBR 5629 – Execução de tirantes ancorados no terreno.* Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT (2010). *NBR 6022 – Projeto e execução de fundações.* Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT (2009). *NBR 11682 – Estabilidade de encostas*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

AASHTO (2002). *Standard Specifications for Highway Bridges*, 17th ed.. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C.

CPRM (2019). *Mapa Geológico Integrado da Região Metropolitana de São Paulo Escala 1:250.000*. Acessado em 18/01/2026. https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/21373/11/mapa_geologico_rmsp.pdf

HABIB, P (1989). *Recommendations for the design, calculation construction and monitoring of ground anchorages.* A. A. Balkema, Rotterdam. 1989

Rocscience (2026). *Documentation and Theory Overview*. Acessado em 01/02/2026. https://www.rocscience.com/help/slide2/overview

YASSUDA, C. T.; DIAS, P. H. V. 1996, *Fundações Teoria e Prática, Capítulo 17 – Tirantes*, Editora Pini, 1ª edição, pp. 603 a 640.