

Projeto de contenção em região com presença de solos colapsíveis

Juliana Lopes dos Anjos

Engenheira civil, Engecorps Engenharia S.A, Barueri, Brasil, juliana.anjos@engecorps.com.br

Wilson Shoji Iyomasa

Geólogo e Prof. Dr^o, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, Brasil, wsj@ipt.br

RESUMO: Apresentam-se os estudos realizados para a escolha de uma solução de contenção executada em uma região com indicativos da presença de solos colapsíveis. A obra faz parte do projeto de duplicação da Rodovia Engenheiro João Tosello (SP-147), no trecho que liga a cidade de Limeira à cidade de Engenheiro Coelho, no interior do Estado de São Paulo. A contenção tornou-se necessária para manter a largura mínima de uma via local existente, paralela e em desnível (abaixo) à pista duplicada. A contenção possui aproximadamente 900m de extensão e altura de cerca de 2,5m. São apresentadas algumas características observadas nas investigações executadas no local, que deram indícios da presença de solos colapsíveis, e as considerações feitas para a escolha das técnicas que foram empregadas na melhoria do terreno de fundação, permitindo adotar uma solução de contenção mais adequada para este contexto. Após os estudos, para melhoria da fundação, optou-se pela execução de uma troca de solo, removendo parte do material compressível (poroso) seguida da recomposição/compactação com reaproveitamento do solo local, visto que este apresenta boas características pós compactado. Para a contenção foi escolhida a técnica de solo reforçado com geogrelhas. O projeto técnico da contenção foi desenvolvido pela Engecorps Engenharia S.A., sendo esta obra implantada na Rodovia Engenheiro João Tosello (SP-147), na altura do km 89, trecho sob concessão da Arteris Intervias.

PALAVRAS-CHAVE: Projeto, Solos Colapsíveis, Contenção, Solo Reforçado.

ABSTRACT: This work presents the studies produced in order to choose a retaining wall solution to be implanted in a region with indications of the presence of collapsible soils. This construction is part of a highway duplication project in the interior of the State of São Paulo, in which a retaining wall became necessary to maintain the minimum width of an existing local road, parallel and at a level below the duplicated lane. The retaining wall is approximately 900 meters long and has a maximum height of about 2.5m. This article also presents some characteristics observed in the soil investigations executed in the area, which gave evidence of the presence of collapsible soil, as well as the considerations made for the choice of the techniques used in the foundation soil improvement, enabling the application of a specific and more appropriate retaining wall solution for this context. After the studies, a partial soil replacement was chosen for the foundation soil improvement, consisting of removing part of the compressible material followed by its replacement with compacted fill that reutilizes the local soil, once it has good post-compaction properties. For the retaining wall, the technique of reinforced soil with geogrids was chosen. Engecorps Engenharia S.A. developed the project of the retaining wall and the highway is Arteris Intervias property.

KEYWORDS: Project, Soils, Collapsible, Retaining wall, Reinforced Soil.

1 Introdução

Para permitir a duplicação da rodovia e conter um desnível de cerca de 2,5m entre a pista projetada/duplicada e uma via local existente, foi elaborado o projeto de uma contenção, a qual desenvolveu-se em um trecho com aproximadamente 900m de extensão.

A caracterização do subsolo local foi realizada através de sondagens a percussão, as quais apontavam a presença de solo pouco resistente com textura essencialmente arenosa até cerca de 10,0m de profundidade e nível d'água em média aos 11m de profundidade, e através da coleta de algumas amostras de solos locais, as quais foram submetidas à ensaios de caracterização, confirmando a textura predominante arenosa dos materiais.

Com base nos aspectos observados e correlacionando tais características com as informações e estudos já realizados em solos similares para a formação geológica local, vislumbrou-se que o subsolo local – fundação da contenção a ser implantada – apresentava características de materiais colapsíveis.

Frente à tais condições, foram executados estudos para avaliação das técnicas exequíveis dentro das premissas existentes, bem como, análise de viabilidade das soluções disponíveis tanto para o tratamento de fundação quanto para a contenção, de maneira que estas estivessem adequadas às particularidades e proposições requeridas à implantação das obras.

2 Solos Colapsíveis

Conforme Rodrigues e Lollo (2008), os solos colapsíveis podem ser encontrados em diversos países, sendo, no entanto mais comuns em regiões de clima quente (atual ou pretérito). Ao longo dos anos os solos colapsíveis vem sendo amplamente estudados em todo mundo.

No Brasil, são característicos de regiões do nordeste e centro-sul, sendo representados por aterros mal compactados e por depósitos aluviais, colúviais e residuais muito lixiviados. Os solos da região centro-sul (interior de São Paulo e Paraná) são solos porosos que englobam solos residuais típicos, solos sedimentares ou colúvios.

A formação deste tipo de solo pode ser de origem eólica, aluvial ou originados de solos residuais, sendo todos normalmente associadas à ausência ou grandes intervalos de precipitação. De maneira geral, a estrutura de solos colapsíveis é basicamente composta por material altamente poroso e em estado aparente de equilíbrio na condição não saturada, já que essa condição (ausência de água nos vazios) propicia um vínculo temporário entre as partículas.

Os principais fatores que são capazes de garantir ao solo uma resistência temporária, são definidos por Rodrigues e Lollo (2008) pelas forças eletromagnéticas de superfície, a sucção e a presença de alguma substância cimentante, como óxidos de ferro e os carbonatos.

A estabilidade provisória ou aparente da estrutura destes solos é interrompida, portanto, quando ocorrem variações (redução) de sucção por umedecimento, mudanças no estado de tensões e alterações do equilíbrio eletromagnético e das ligações cimentantes.

A quebra de estrutura do solo que acarreta o colapso, conforme Rodrigues e Lollo (2008), pode se manifestar por ação simples ou combinada de dois mecanismos: aumento do teor de umidade nos vazios do solo e, tensões que excedem o valor limite. Sendo o processo de umedecimento caracterizado como a maior causa de colapso deste tipo de solo, já que, como citado, propicia a quebra de sua estrutura aparente estável e causa redução de volume da camada de forma brusca.

Em contrapartida, quando devidamente compactado, processo no qual é reduzida a sua porosidade, resulta em um material com alta resistência e baixa condutividade hidráulica, conferindo um material com excelentes características para o emprego em aterros, como solo compactado.

3 Caracterização do Subsolo na Área de Interesse

3.1 Geologia Local

A obra está situada no contexto geológico da Formação Tatuí pertencente à Bacia Sedimentar do Paraná, composto pelos arenitos finos e siltitos da Formação Tatuí e seus solos de alteração.

Segundo Barbosa-Gimenez (1996 apud BARBOSA-GIMENEZ; CAETANO-CHANG, 2010, p. 70):

[...] os arenitos da Formação Tatuí são compostos basicamente por quartzo e feldspatos e, subordinadamente, por fragmentos de rocha e minerais acessórios. [...] Nos arenitos da Formação Tatuí é comum a presença de minerais formados por óxidos de ferro (provavelmente magnetita) e titânio (ilmenita ou titano-magnetita); é também comum a alteração de biotita para clorita, liberando dessa forma o elemento ferro.

3.2 Sondagens a Percussão

Na etapa de investigação do terreno realizaram-se sondagens a percussão, cujos resultados indicaram nos primeiros 10m a ocorrência de uma camada de baixa resistência, com índice de N_{SPT} de 1 a 5 golpes, sobreposta a um material ligeiramente mais resistente, com cerca de 7,0m de espessura e N_{SPT} de 5 a 12 golpes, e, por fim, solo saprolítico de média a alta resistência, crescente com a profundidade, atingindo valores de N_{SPT} superiores a 40 golpes. O nível d'água nesta região foi observado em média com 11,0 m de profundidade. A porção superior composta por essa camada pouco resistente é de textura predominantemente arenosa.

Na Figura 1 é apresentado o resultado de um dos boletins de sondagem a percussão. É possível verificar no horizonte superior uma espessa camada de solo pouco competente e em seguida, a partir da presença do nível d'água, é observado um ganho no índice de N_{SPT} .

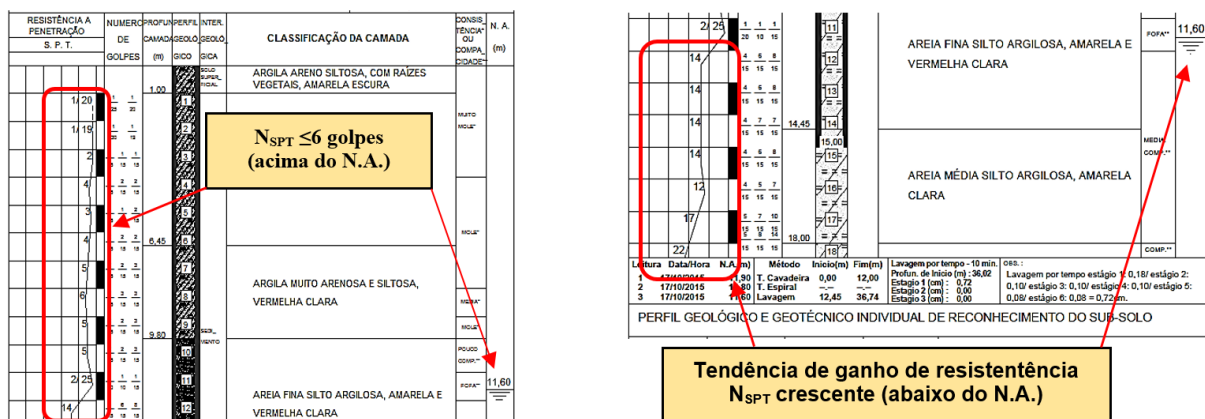


Figura 1. Perfil geológico observado na sondagem a percussão.

3.3 Ensaios de Caracterização

Além das sondagens a percussão, realizaram-se também ensaios de caracterização granulométrica em algumas amostras extraídas do solo local, permitindo observar com detalhe a variação da textura das camadas de solo. As amostras foram retiradas com profundidade de 0,15m a 2,0 m e os resultados obtidos estão resumidos na Tabela 1, que mostra a composição de percentuais de frações granulométricas da camada investigada.

Tabela 1 – Escala Granulométrica – NBR 6502/1995

Sondagem	Argila (%) A < 0,002	Silte (%) 0,002 < S < 0,06	Areia fina (%) 0,06 < AF < 0,2	Areia média (%) 0,2 < AM < 0,6	Areia grossa (%) 0,6 < AG < 2,0	Pedregulho (%) 2,0 < P < 60
ST-05	19,3	7,5	27,8	42,6	2,9	0
ST-06	18,3	6,6	26,4	44,7	4,0	0
ST-07	18,6	6,7	31,9	41,4	1,5	0
ST-08	7,2	5,0	40,1	46	1,7	0
ST-09	8,8	6,6	41,4	39,8	3,4	0
ST-10	7,2	5,0	43,3	42,6	1,8	0
ST-11	7,0	4,9	40,5	42,4	4,0	1,2

Os ensaios indicaram que os materiais são compostos predominantemente por parcelas de areia e argila (sendo cerca de 70 a 80% de areia) e baixa fração de silte, tratando-se de camadas extremamente porosas. Tais aspectos, aliados ao histórico observado da formação geológica local – e solos residuais lixiviados observados no local – deram indicativos de que os materiais presentes no subsolo poderiam se tratar de solos colapsíveis. Desta forma, em posse de tais informações foram iniciados os estudos de implantação da contenção e, dada as

características locais, do tratamento de fundação para restringir/minimizar a ocorrência de eventuais deformações (recalques) na fundação que poderiam comprometer o desempenho da contenção e por consequência da rodovia.

4 Desenvolvimento do Projeto

4.2 Localização e Características da Obra

A contenção foi implantada na Rodovia Engenheiro João Tosello (SP-147), aproximadamente no km 89, no trecho que liga a cidade de Limeira à cidade de Engenheiro Coelho, interior do Estado de São Paulo.

Como citado anteriormente, dada a necessidade de manutenção de uma via local para acesso às propriedades lindeiras, a qual se encontra paralela à faixa duplicada e, devido ao desnível observado entre o greide projetado e a via local, optou-se por executar um maciço com face subvertical, visto que a execução de taludes em aterro (1,5H:1V) ocasionaria o avanço sobre a área da via a ser preservada.

Desta forma, para atender tais condicionantes, foi desenvolvido o projeto de uma contenção em solo reforçado com geogrelhas, com altura de aproximadamente 2,5m e extensão de aproximadamente 900m. Foi considerada a execução de um sistema de face verde, compatibilizando a estética com o entorno, sendo adotada uma inclinação da face de 6V:1H.

Na Figura 2 é apresentada uma seção transversal típica indicando a posição de inserção da contenção.

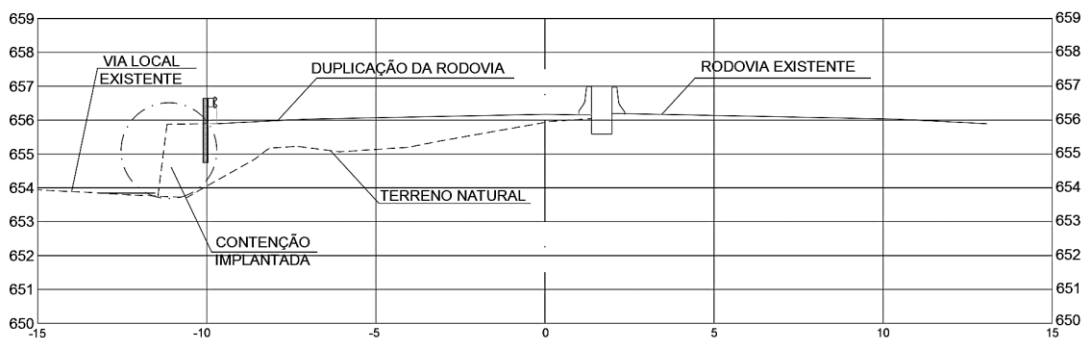


Figura 2. Seção transversal típica – posicionamento da contenção.

4.3 Tratamento de fundação

Dada as características do solo na região, foi necessário recorrer a uma alternativa para melhoria da capacidade de suporte do terreno, minimizando a possível ocorrência de recalques na fundação e consequente deformações na via projetada. A escolha de uma solução para melhoria do terreno tinha como principal premissa representar baixa interferência e ser compatível com a pista existente, além de garantir o desempenho requerido à via projetada. Desta forma, foram estudadas as alternativas para o tratamento de fundação e avaliada a viabilidade técnica e econômica.

As técnicas com colunas de brita ou colunas de solo cimento são bastante usuais e induzem a uma expressiva melhoria no terreno. No entanto, no estudo comparativo, estas alternativas foram descartadas pois são soluções de maior custo, principalmente no que se refere à mobilização de equipamentos e insumos, além da possibilidade de ocorrência de recalques diferenciais (deformações pronunciadas no pavimento), visto que nessa região a fundação seria muito mais robusta que na região próxima ao canteiro central.

Outra técnica bastante usual para melhoria do terreno, consiste no processo de drenagem e consolidação do terreno local, podendo ser auxiliado/acelerado com um aterro de sobrecarga, favorecendo o adensamento (diminuição dos vazios/expulsão de água intersticial) e conferindo melhores condições de suporte e redução nas deformações. No entanto, esta técnica é mais empregada e efetiva em terrenos compostos por solos predominantemente finos e saturados, condição não observada nos solos locais, sendo, portanto, descartada.

Desta forma, considerando a maior profundidade do nível d'água e a presença de solos locais que, quando compactados apresentam excelente condição de suporte, foi selecionada uma solução de tratamento de

fundação que compreendeu a remoção de parte deste solo poroso (potencialmente colapsível) em uma espessura pré-definida e, realizada a recompactação deste material possibilitando uma melhoria significativa nas suas características quanto à capacidade de suporte (fundação da contenção).

4.3.1 Troca de solo – Remoção e recompactação

A alternativa de troca de solo, que compreende a remoção da camada compressível seguida de recompactação, apresentou-se vantajosa para o projeto, sendo esta bastante usual e econômica, quando comparadas à outras técnicas, já que não requer a mobilização de equipamentos especiais/diferentes dos já empregados na obra.

Em aspectos técnicos, esta alternativa mostrou-se vantajosa visto que o processo de compactação propicia maior contato entre os grãos, reduzindo o volume de vazios, diminuindo a compressibilidade e a permeabilidade, tornando a camada compactada mais resistente e homogênea. Nas sondagens executadas, não foi observado nível d'água próximo à superfície, facilitando o processo de remoção e recompactação.

Para avaliação da efetividade da solução, foram realizadas análises de tensão-deformação do terreno, de forma a avaliar o comportamento e desenvolvimento das tensões no solo permitindo definir a espessura de remoção tal que propiciasse uma redução significativa nas deformações/recalques futuros.

As análises de tensão-deformação foram realizadas com o auxílio do software de modelagem por elementos finitos da Rocscience® Phase 2, em sua versão 7.0. A Figura 3 apresenta o resultado observado nas análises.

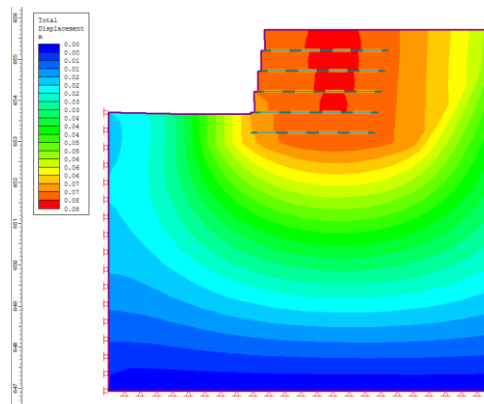


Figura 3. Análise de tensão-deformação por MEF.

Com base nos resultados das análises de tensão-deformação, foi considerado como critério uma remoção de pelo menos $0,4 \times B$ de espessura, sendo B correspondente a largura da base do maciço e a espessura definida em função do desenvolvimento/profundidade do bulbo de tensões observados nas análises.

As verificações da base mínima (B) foram efetuadas com base nos critérios de verificação de equilíbrio externo de contenções, a partir da avaliação da segurança ao deslizamento, tombamento e estabilidade global. Em função desses critérios, o tratamento de fundação resultou em espessuras da ordem de 0,80 a 1,20m para os trechos de menor e maior altura, respectivamente.

Com as espessuras definidas, foi indicada a remoção do material compressível, seguido do processo de recomposição/recompactação do terreno escavado. Para recomposição, após preparo da base, foi indicado o reaproveitamento do próprio solo local removido, compactado com teor próximo da umidade ótima ($\pm 1,5\% w_{ot}$) que indicou boas características para compactação. Com a finalidade de propiciar um material com menor índice de vazios e mais resistente, foi requerido um grau de compactação de pelo menos 98% na energia intermediária.

4.4 Solução de Contenção

A contenção implantada no projeto em questão, possuía como premissa a compatibilidade com o tratamento de fundação adotado, bem como, resultar em face subvertical para preservação da via local existente, paralela à contenção.

A alternativa de contenção com muros de concreto (muro à flexão), embora atendessem a premissa de subverticalidade da contenção, foi descartada visto que, por tratar-se de uma estrutura mais rígida, seria incompatível com a solução adotada no tratamento das fundações, a qual admite certa acomodação do terreno, podendo causar danos a este tipo de estrutura.

Outra alternativa disponível, muito usual e econômica, quando comparadas aos muros de concreto, é o emprego de muros de gabião, que, diferente da alternativa de muro de concreto, normalmente, possui maior tolerância às pequenas acomodações do terreno, permitindo que a estrutura distribua e se comporte melhor diante de pequenas deformações. No entanto, esta alternativa também foi descartada em função da dificuldade de compatibilização com os elementos de segurança da rodovia (pilaretes da defesa metálica). Dada a posição de instalação da contenção e dos elementos de segurança, estes necessitariam ser embutidos na contenção, o que se tornou inviável em função do material constituinte da alternativa em gabião.

Desta forma, visando atender a premissa de flexibilidade e adequabilidade aos elementos de segurança da rodovia, foi estudada a implantação de uma contenção em solo reforçado com geogrelhas.

4.4.1 Solo reforçado com geogrelhas

Conforme definição de Geroto et al. (2018), a técnica de solo reforçado consiste em executar o alteamento de uma contenção em solo compactado, intercalando inclusões (reforços) com resistência e espaçamentos pré-definidos no interior desse maciço.

Dentre as alternativas de contenção passíveis de execução para este projeto, esta técnica se tornou atrativa, principalmente, em função de sua flexibilidade, fator condicionante na escolha da contenção, visto que, conforme citado, pequenas deformações em função da acomodação do terreno eram esperadas.

Além desta vantagem, os muros em solo reforçado destacam-se pela simplicidade e velocidade construtiva, refletindo diretamente no cronograma e economia da obra. Geroto et al. (2018) destacam que a facilidade de aquisição e controle das propriedades dos materiais geossintéticos também compõe as principais vantagens desta técnica somada a estética final da obra. Quando comparada às soluções com fitas metálicas (terra armada), além do menor custo executivo, a solução em solo reforçado com geossintéticos apresenta a vantagem de permitir o emprego de solos mais graduados, em geral solos locais, e o uso de equipamentos mais comuns às obras de terraplenagem.

Nas Figuras 4a e 4b podem ser observados os elementos que compõem a solução implantada.

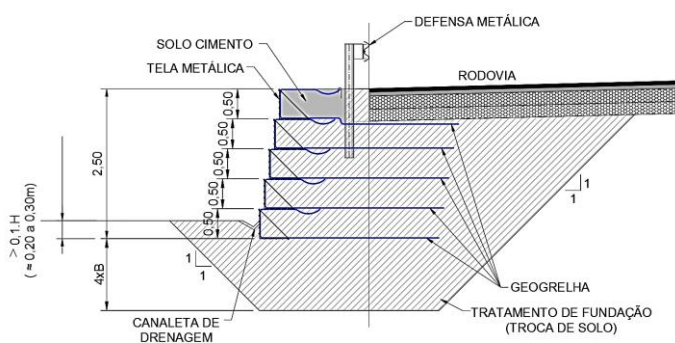


Figura 4a. Detalhes da solução escolhida

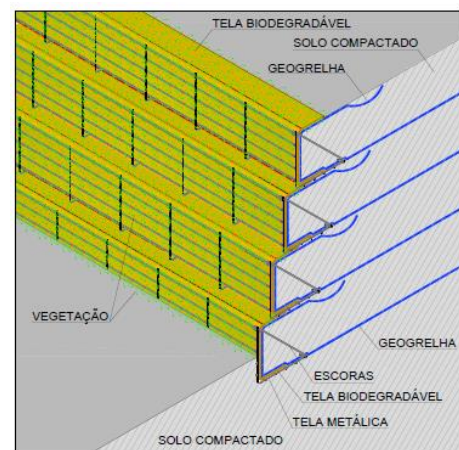


Figura 4b. Perspectiva da solução escolhida

4.4.2 Dimensionamento e Características da Contenção

A verificação do desempenho da contenção compreendeu as análises de estabilidade externa, tais como: segurança ao deslizamento, tombamento, capacidade de carga da fundação e estabilidade global. Para a determinação do tipo de geogrelha a ser utilizada, foram realizadas as análises de estabilidade interna, sendo

adotada a metodologia FHWA, proposta por Mitchell e Villet (1987), para dimensionamento das geogrelhas, para atender aos esforços de tração e arrancamento (comprimento mínimo).

A verificação da resistência à tração necessária das geogrelhas foi determinada pelo método de empuxo, sendo que, a camada do solo reforçado recebe solicitação proporcional à sua posição na vertical, sendo considerado um fator de redução para determinação da resistência característica requerida à geogrelha em cada camada. Definiram-se os comprimentos dos reforços com base nos esforços atuantes, considerando uma cunha de ruptura hipotética no maciço terroso.

A contenção executada é composta por geogrelhas tecidas (PET revestidas em PVC), instaladas com espaçamento vertical de 0,50 m e com resistência à tração longitudinal de projeto de 10 kN/m. O sistema de faceamento foi definido com inclinação de 6V:1H e é composto por telas metálicas dobradas (forma perdida) que permitem maior controle dimensional na execução e admitem pequenas deformações na base, além de permitir, com o auxílio de uma biomanta e sementeira, a construção de um muro verde com face vegetada, conferindo um bom aspecto visual.

As análises de estabilidade global foram realizadas pelo software Slide, desenvolvido pela Rocscience®, na versão 7.0. Para a determinação dos fatores de segurança (FS) utilizou-se o método de Bishop simplificado.

Na Figura 5 é apresentado o resultado de uma análise de estabilidade, sendo possível observar fator de segurança satisfatório ($FS \geq 1,50$).

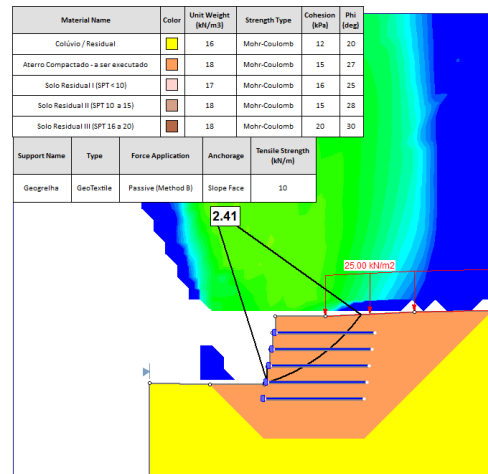


Figura 5. Análise de estabilidade global.

A execução do muro se deu de forma concomitante ao alteamento do aterro executado para a pista duplicada, e o acompanhamento técnico permitiu observar o processo evolutivo e o desempenho da alternativa adotada. Não foram observados recalques significativos na pista projetada e a estrutura mostrou comportamento satisfatório ao contexto inserido.

Nas Fotos 2 e 3 apresentam-se as perspectivas finais da contenção após a conclusão da obra e da pista duplicada da rodovia.



Foto 2. Muro de contenção implantado (nov/2019).



Foto 3. Pavimento da pista duplicada (nov/2019).

Na Foto 2 observa-se a contenção já implantada com a vegetação em crescimento na face, aspecto esperado para a estrutura. Na Foto 3 observa-se a pista duplicada, já em operação, não sendo notadas deformações e/ou intercorrências significativas no pavimento da faixa duplicada.

5 Conclusões

A partir dos resultados da campanha de investigação e do conhecimento acerca da Formação Geológica local associado à observação de indícios de ocorrência de solos colapsíveis apontados nas investigações e nas bibliografias consultadas, foi possível definir uma técnica adequada para melhoria da capacidade de suporte do terreno, na área de implantação da contenção. A solução escolhida para o tratamento da fundação promoveu o reaproveitamento do solo removido otimizando a busca de materiais nobres, resultando em uma alternativa técnica e economicamente adequada, não representando grandes interferências às estruturas e vias existentes.

Já a solução escolhida para a contenção composta pelo maciço em solo reforçado, conferiu flexibilidade à estrutura, fator preponderante na escolha da solução, atrelada à possibilidade de obtenção de matéria prima (solo) do próprio local, refletindo também na economia e cronograma da obra, além de proporcionar um aspecto visual mais agradável com o muro de face verde.

O acompanhamento do processo de execução das soluções propostas, conforme mostram os registros fotográficos, permitiram verificar a adequabilidade das técnicas escolhidas ao local. Cabe destacar que no que se refere às correlações empregadas para interpretação do terreno, ainda que tenham se apresentado bem-sucedidas para o projeto em questão, não dispensam a execução de ensaios específicos de laboratório, com os quais é possível identificar de maneira mais acurada as características dos materiais e conseqüentemente o comportamento do terreno, para as mais diversas finalidades.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Concessionária Arteris Intervias e a Empresa Engecorps Engenharia S.A. pelo apoio concedido e pela disponibilização de informações utilizadas no desenvolvimento deste documento.

REFERÊNCIAS

GEROTO, R. E.; RODRIGUES, A. P.; ANJOS, J. A. Muro em Solo Reforçado com Geossintéticos com 25m de Altura na Rodovia dos Tamoios. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19., 2018. **Anais...** São Paulo: ABMS, 2018. 9 p.

GIMENEZ, N. L. B.; CHANG, M. R. C. Diagênese de arenitos da Formação Tatuí no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 40, n. 1, p. 68-79, 2010.

MITCHELL, J. K.; VILLET, W. C. B. **Reinforcement of Earth Slopes and Embankments**. Washington: TRB, 1987. 323 p. (NCHRP Report 290 - Transportation Research Board).

RODRIGUES, R. A.; LOLLO, J. A. **Solos Colapsíveis: Identificação, comportamento, impactos, riscos e soluções tecnológicas**. São Paulo. UNESP, 2008. 264 p.