

Solo Reforçado com Geogrelhas como Alternativa para Pista Inferior de Viaduto Beliche

Paulo José Brugger

Diretor Técnico, Brugger Engenharia Ltda., São José dos Campos, Brasil, paulo@brugger.eng.br

Cristina F. Schmidt

Diretora Técnica, Huesker Ltda., São José dos Campos, Brasil, cristina@huesker.com.br

Ivan Steinmeyer

Diretor, Steinsolos Engenharia Ltda., São Paulo, Brasil, ivan02@uol.com.br

Eduarda Stephanie de Mello

Engenharia Civil, EGTC Infra S.A., Cubatão, Brasil, eduarda.mello@egtc.com.br

RESUMO: Os Contornos de Caraguatatuba e São Sebastião são novos trechos da Rodovia dos Tamoios entre as duas cidades. Em sua chegada à São Sebastião, a obra conta com o complexo de Obras de Arte Especiais (OAE) da Topolândia. Na saída do último par de túneis na região, o projeto original previa que as pistas se juntariam uma sobre a outra, formando um viaduto tipo "beliche" conectado aos túneis. Devido à necessidade de entrega da obra dentro do prazo estipulado, foi feita a substituição da pista inferior do viaduto por uma estrutura em solo reforçado com geogrelhas apoiada diretamente no terreno, com altura máxima de 12 m e extensão de cerca de 400 m. A estrutura de solo reforçado em formato de trapézio utilizou geogrelhas de poliéster, sendo o acabamento da face dado por telas metálicas rotuladas e galvanizadas, preenchidas com pedras. Os aterros foram executados com o material britado proveniente da escavação dos túneis. As investigações geotécnicas realizadas no local indicaram a presença de solos bastante variáveis, desde solos residuais e alteração de rocha nas encostas e desemboque dos túneis até espessas camadas de argilas marinhas muito moles. Nas áreas com boa capacidade de carga, foi executada apenas uma camada de rachão para regularização e drenagem da base da contenção em solo reforçado, enquanto nos trechos com solos moles foi realizado o reforço do terreno com colunas DSM (Deep Soil Mixing). O artigo apresenta aspectos do dimensionamento e da execução da estrutura de solo reforçado.

PALAVRAS-CHAVE: Solo reforçado, Geogrelha, Face em tela metálica, Geossintético, Contenção.

ABSTRACT: The Caraguatatuba the São Sebastião Road Rings are new segments of the Tamoios Highway between the two cities. The Southern Ringroad was inaugurated in November 2024 and connects km 11 of the Tamoios Highway. On its final part in São Sebastião, the road includes the Topolândia complex. At the exit of the last pair of tunnels in the region, the original project foresaw that the lanes would join one over the other, forming a "bunk" type viaduct connected to the tunnels. However, due to the need to reduce the construction deadline, the structure of the lower lane of the viaduct was replaced by a geogrid-reinforced soil structure supported directly on the ground, with a maximum height of 12 m and a length of around 400 m. The trapezoid-shaped reinforced soil structure used polyester geogrids and was finished with galvanized, folding metal mesh, filled with stones up to 20 cm in diameter. In the sections with good load-bearing capacity of the terrain, only a layer of gravel was used to regularize and drain the base of the reinforced soil wall, while in the sections with soft soils, the ground was additionally reinforced with DSM (Deep Soil Mixing) columns. The article presents aspects of the design and execution of the reinforced soil structure.

KEYWORDS: Reinforced soil, Geogrid, Metallic facing, Geosynthetic, Wall.

1 INTRODUÇÃO

A Rodovia dos Tamoios, entre os municípios de São José dos Campos, às margens da Rodovia Presidente Dutra, e Caraguatatuba, na Rodovia Rio-Santos, é a principal ligação entre o Vale do Paraíba e o litoral norte do estado de São Paulo. Em 2015, passou a ser administrada pela Concessionária Tamoios.



Na chegada a Caraguatatuba, a Rodovia dos Tamoios é conectada aos Contornos Norte e Sul, também chamados respectivamente de Contornos de Caraguatatuba e de São Sebastião, com extensão total de cerca de 34 km. As obras dos Contornos foram paralisadas em 2018 e retomadas em outubro de 2021, assumidas pela Concessionária Tamoios. A obra foi finalizada em 2024, formando um moderno e seguro complexo viário na região do Vale do Paraíba e Litoral Norte de São Paulo, aliviando o fluxo para os turistas que procuram a região de praias e aumentando a capacidade de carga para o Porto de São Sebastião.

De modo geral, o projeto original contemplava as contenções da obras dos Contornos em aterro com muros no sistema de solo reforçado com tiras metálicas e face em escamas de concreto armado ou em cortinas atirantadas. Com a retomada das obras dos Contornos e o estabelecimento de prazos bastante exíguos para entrega do novo sistema viário litorâneo, algumas soluções previstas no projeto original precisaram ser revistas para minimizar custos e, principalmente, reduzir prazos de execução, de forma a atender ao cronograma da obra.

A primeira contenção em solo reforçado com geogrelhas dos Contornos foi o muro C11 do Lote 1, cujo projeto original constava de uma cortina atirantada com face em concreto armado apoiada sobre uma linha de estacas raiz, em aterro. Estando essa contenção parcialmente executada quando da paralisação da obra, com cerca de 1/3 dos tirantes instalados, a construtora optou por uma mudança de projeto. O complemento do aterro por trás da parede em concreto armado foi realizado com a técnica de solo reforçado com geogrelhas e face envelopada com gabarito metálico perdido, eliminando-se a necessidade de execução da maioria dos tirantes que faltavam e trabalhando com seções mistas, onde a parte inferior contempla os tirantes já executados e a parte superior em solo reforçado com geogrelhas (Schmidt et al, 2021). A partir dessa primeira experiência positiva em termos de custos e prazo de execução, as demais contenções em aterro previstas para a obra, originalmente projetadas com outras técnicas, foram alteradas para contenções em solo reforçado com geogrelhas e face em gabarito metálico com acabamento em pedra.

A contenção em solo reforçado como alternativa à pista inferior do viaduto beliche na região da Topolândia foi uma das últimas estruturas construídas na obra e a mais impressionante desse conjunto.

2 OAEs 403 E 405 - ALTERAÇÃO DE PROJETO

Quando do início do planejamento para construção das OAEs 403 e 405 em beliche, a construtora buscou soluções alternativas, principalmente por conta de metodologia executiva e do prazo muito apertado para entrega da obra. No projeto original, o lançamento das vigas da mesoestrutura da pista inferior seria feito com guindaste, o que impediria a construção simultânea da mesoestrutura da pista superior, comprometendo o cronograma da obra. Assim, de forma a possibilitar a construção simultânea das duas pistas dentro do cronograma, foi idealizada a troca da mesoestrutura da pista inferior pelo maciço em solo reforçado em formato trapezoidal. Na mesma obra, experiências com contenções em solo reforçado já tinham demonstrado se tratar de um sistema construtivo bastante rápido (Schmidt et al, 2021).

A OAE 403 (pista superior) possui 1.035 m de extensão total, consistindo no encontro E.1 e nos apoios AP.1 a AP.20. A OAE 405 (pista inferior) originalmente constava de 299 m de extensão total, com os Encontros E.1' e E.2' e os apoios AP.1' a AP.11'. A estrutura de solo reforçado foi adotada entre E.1' e AP. 4' da OAE 405 e entre AP.7 e AP.17 da OAE 405, dividida em Trechos 1 e 2, separados pelo Acesso CTEEP. A Figura 1 mostra as seções transversais do projeto original e da alternativa em solo reforçado para o trecho em beliche. A Figura 2 apresenta imagens da obra em andamento.

Além da adequação ao cronograma da obra, foram observados outros aspectos de interesse da solução em termos de logística, otimização de recursos naturais e sustentabilidade:

- Aproveitamento de material pétreo proveniente da escavação dos túneis e taludes em rocha.
- Menor geração de resíduos de construção como formas e armações, uma vez que o sistema não necessita de formas para execução e os componentes industrializados como a tela metálica da face e as geogrelhas já são entregues prontos para aplicação na obra.
- Menor espaço para armazenagem de materiais e canteiro de obras, minimizando, por exemplo, a área para o pátio de concretagem.

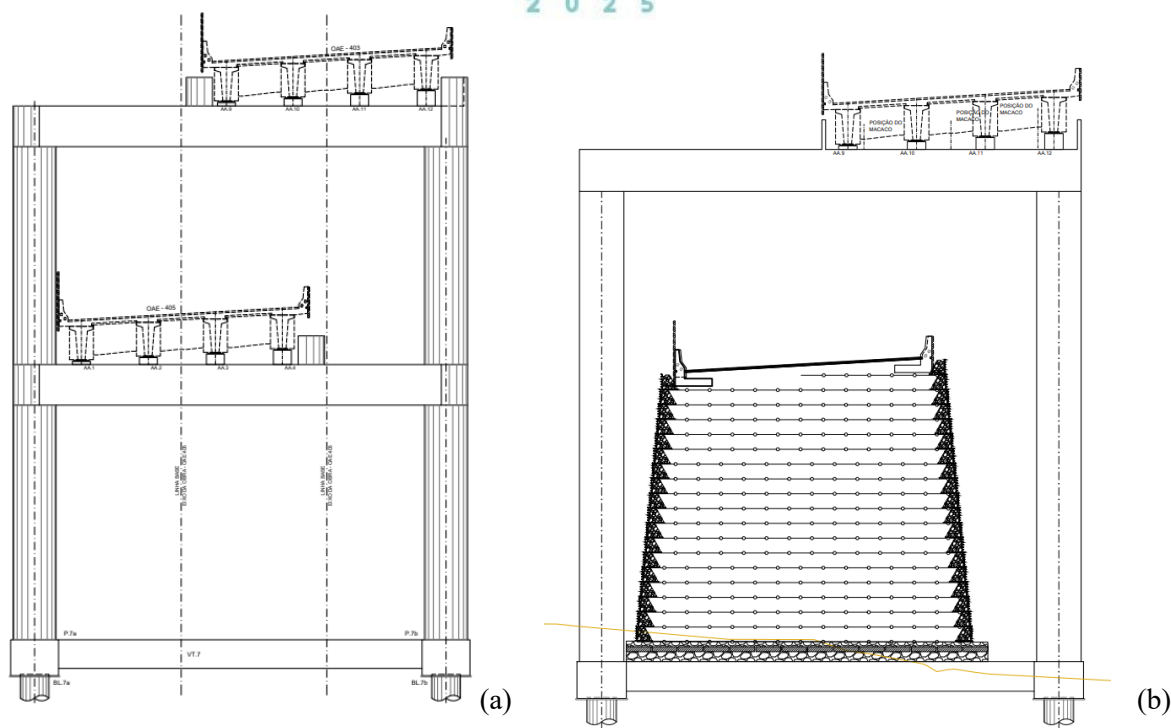


Figura 1. Seções do projeto original (a) e da alternativa em solo reforçado (b) – OAEs 403 e 405.



Figura 2. (a) Vista aérea do primeiro trecho da estrutura até o Acesso CTEEP (b) Início do trecho em beliche

3 ESTRUTURA DE SOLOS REFORÇADOS COM GEOSSINTÉTICOS

Em maciços de solos reforçados, a inclusão de geogrelhas como elemento de reforço do aterro propicia uma redistribuição global das tensões e deformações, permitindo a adoção de estruturas com face vertical (muros) ou maciços mais íngremes (taludes), minimizando o volume de aterro compactado. A presença dos reforços na estrutura de contenção gera uma força de tração resistente que atua no sentido de equilibrar a massa de aterro que tende a se romper. Esses reforços podem constituir-se de geogrelhas com propriedades mecânicas adequadas a esse fim, ou seja, elevada resistência à tração e baixa deformação e devem ser dimensionados de forma a garantir as condições de estabilidade do muro imediatamente após sua construção e ao longo da vida útil da obra. A estabilidade de maciços reforçados também deve ser garantida pelos mecanismos de interação solo-reforço, ou seja, a capacidade de ancoragem da geogrelha, função das suas características geométricas e da tensão de confinamento à qual está submetida.

A norma ABNT NBR 16920-1/2021 especifica os requisitos de projeto e execução de muros e taludes em meios terrosos contínuos reforçados. De modo geral os muros são dimensionados para faixas de altura que englobam várias seções da obra e o comprimento dos reforços deve ser no mínimo igual a 70% da altura do muro em qualquer situação. Já para o caso de corpos de aterro lineares e esbeltos os reforços podem ser inseridos em toda a largura da plataforma de aterro, sendo ancorados nas duas faces da estrutura.

O dimensionamento e as verificações do maciço reforçado foram realizados em duas etapas:

1 - Análises de estabilidade global por equilíbrio limite utilizando o programa Slide. Esse tipo de superfície potencial de ruptura visa analisar a estabilidade interna, externa e mista. Um exemplo deste dimensionamento é apresentado na Figura 3.

2 - Verificação individual dos reforços em função das tensões verticais e horizontais na massa de solo. Essa análise visa garantir que nenhuma geogrelha esteja trabalhando com tensões acima do projetado nas análises anteriores. Nessa verificação, foi utilizado o método da rigidez relativa de Ehrlich (1999), que calcula a carga individual em cada camada de reforço a partir do espaçamento entre geogrelhas, das propriedades de resistência e rigidez da geogrelha e da energia de compactação induzida pelo equipamento de compactação.

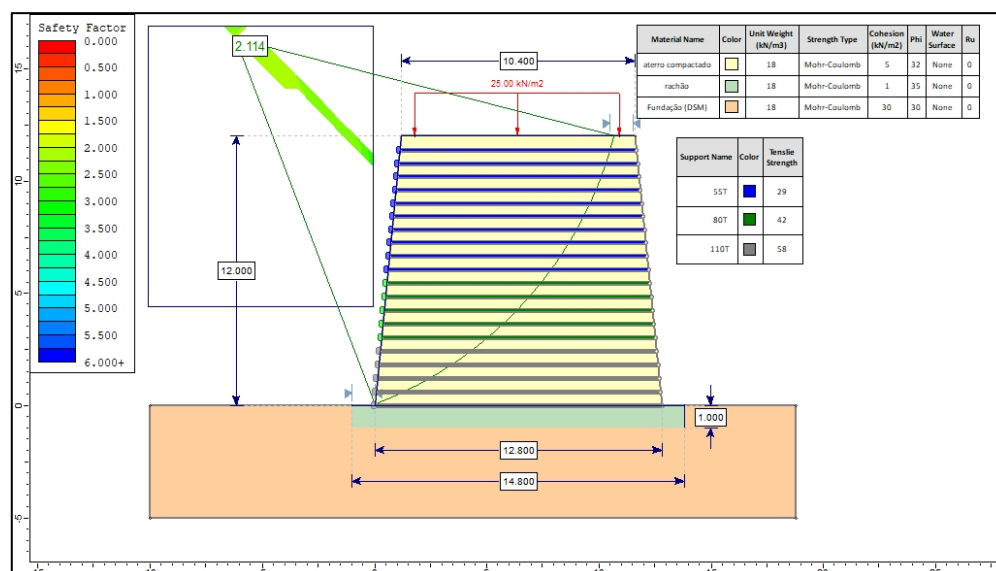


Figura 3. Análise de estabilidade global para altura de 12 m com Fator de Segurança de 2,11. (eixos “x” e “y” em metros)

3.1 Fundação

As investigações geotécnicas realizadas no local indicaram a presença de solos bastante variáveis, desde solos residuais e alteração de rocha nas encostas e desemboque dos túneis até espessas camadas de argilas marinhas muito moles nos trechos de baixada. Para a fundação dos muros foi desenvolvido projeto específico, sendo que nos trechos com boa capacidade de carga foi executada apenas uma camada de rachão para regularização e drenagem da base, com apoio do solo reforçado diretamente sobre o terreno, enquanto nos trechos com solos moles realizou-se o reforço em colunas Deep Soil Mixing (DSM) com projeto específico, também com camada de rachão na base dos muros sobre as colunas DSM para regularização e drenagem da base dos muros.

3.2 Geogrelhas

Segundo Ehrlich & Becker (2009), podem-se utilizar diversos tipos de reforço para estruturas de contenção em solo reforçado como reforços metálicos, geogrelhas ou geotêxteis. As geogrelhas são especialmente produzidas para reforço de solo. São polímeros em malha de estrutura plana, muito aberta,



em formato de grelha. Segundo Gerscovich et al. (2016), o projetista deve não somente estar atento à tração máxima que será imposta ao reforço durante o período construtivo e pós-construtivo, mas também garantir que as deformações impostas ao reforço sejam compatíveis, durante toda a vida útil da estrutura, com a funcionalidade e a estética do muro de contenção. Daí a importância da escolha de reforços com rigidez adequada à sua aplicação.

No dimensionamento das estruturas de solo reforçado, deve ser considerada a resistência à tração disponível (T_D) do reforço, definida como a resistência à tração característica (T_{char}) ou nominal dividida pelos fatores de redução (RF) e pelo fator de segurança de incertezas (f_s), que considera a variação estatística dos fatores de redução de acordo com a formulação:

$$T_D = \frac{T_{char}}{RF_{CR} \times RF_{ID} \times RF_{CH} \times f_s} \quad (1)$$

Onde:

- RF_{CR} é o fator de redução devido à fluência.
- RF_{ID} é o fator de redução devido aos danos de instalação.
- RF_{CH} é o fator de redução devido à degradação química e biológica.

Segundo a norma ABNT NBR16920-1/2021, T_{char} é tipicamente a resistência à tração característica do reforço, com um nível de confiança mínimo de 95%, informada pelo fabricante e assegurada pelo fornecedor. Cabe ao fornecedor declarar e assegurar os valores de resistência à tração característica, por meio de um sistema de qualidade assegurada pelo fabricante ou por avaliação independente.

O projeto deve especificar as características mínimas requeridas pelo reforço, de acordo com as premissas de cálculo. O executor deve verificar o atendimento a essas propriedades a partir de certificação do fabricante ou através de ensaios comprobatórios. O fornecedor deve apresentar a curva de carga por unidade de largura versus deformação obtida em ensaios de tração de curto prazo. Para reforços geossintéticos, o fornecedor deve disponibilizar também a curva de carga por unidade de largura versus deformação obtida em ensaios de tração de longo prazo (curvas isócronas).

Para reforços geossintéticos, devem ser especificados em projetos:

- O tipo de geossintético de reforço.
- A resistência à tração característica (T_{char}) na direção principal de tracionamento.
- A resistência à tração disponível (T_D) na direção principal de tracionamento.
- O(s) fator(es) de redução considerado(s) e as condições de projeto para este(s) fator(es).
- O fator de interação considerado entre o solo e o reforço.

A Figura 4 apresenta exemplo de resultados de ensaios de resistência à tração das geogrelhas entregues na obra, como parte do controle de qualidade de fabricação das geogrelhas. Já a tabela 1 apresenta os valores de resistência disponível para 120 anos e os fatores de redução das geogrelhas.

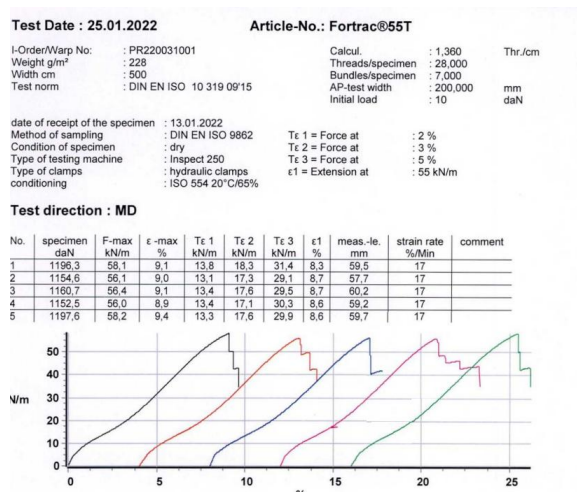


Figura 4. Controle de qualidade – Ensaio de tração

Tabela 1. Características das Geogrelhas Utilizadas na Obra – Direção Longitudinal
Referência: Certificado British Board of Agrément (BBA)

Resistência à tração característica T_{char}	Resistência à tração disponível T_D (120 anos, 20°C)	Alongamento para T_{char}	$RF_{CR} \times RF_{ID}$ $\times RF_{CH} \times f_s$
55 kN/m	31 kN/m	9,5±1,5%	1,76
80 kN/m	45 kN/m	9,5±1,5%	1,76
110 kN/m	65 kN/m	9,5±1,5%	1,68

3.3 Sistema de Face

Como elemento de face na estrutura de solo reforçado foram utilizados módulos de tela metálica em “L” com 250 cm de largura por 60 cm de altura livre, preenchidos com pedras. A estrutura das telas consta de barras de 8 mm de diâmetro com espaçamento de 10 cm nas duas direções no painel vertical (frontal) da contenção e de barras de 6 mm de diâmetro com espaçamento de 10 cm nas duas direções na parte horizontal do painel que fica enterrada entre camadas de reforço e solo compactado conforme apresentado na figura 5(a). As telas receberam dupla camada de galvanização por serem instaladas no litoral, ambiente mais agressivo em termos de durabilidade das peças metálicas. A barra com diâmetro de 8 mm da tela frontal apresenta menor risco de danos por vandalismo, sendo esse um ponto fundamental na aprovação do sistema construtivo, uma vez que a estrutura de solo reforçado fica em área habitada e deve ter maior resiliência ao vandalismo.

O espaçamento entre geogrelhas também é modulado em 60 cm pela altura dos painéis. A montagem dos painéis é feita simultaneamente à compactação das camadas de aterro e colocação das geogrelhas, sendo os painéis a própria forma de compactação. Na execução do sistema, não há necessidade de concretagens, cortes ou dobras das telas, que são apenas montadas no local definitivo e travadas através de ganchos de aço. Não é preciso nenhum tipo de forma ou escoramento. Para facilitar o transporte e o manuseio das telas metálicas, o sistema conta com uma rótula que permite que as telas sejam carregadas dobradas e instaladas na obra na posição final através de montagem manual. Uma vantagem executiva desse sistema é a possibilidade de preenchimento da face com pedras de forma mecanizada, conforme Figura 5(b).



Figura 5. Montagem dos módulos (a) e preenchimento mecanizado com rachãozinho na face (b).

3.4 Aterro Compactado

Ainda segundo a norma ABNT NBR16920-1, o solo reforçado com geossintéticos pode utilizar o solo do próprio local da obra, mesmo sendo de granulometria mais fina, desde que atenda requisitos mínimos. No caso específico dessa obra, não foi necessário o uso de solos mais finos, uma vez que as escavações dos cortes e dos túneis da obra geraram um grande volume de material pétreo. Parte desse material foi utilizado como aterro nas estruturas de solo reforçado com geogrelhas, após sua britagem e transformação em pó de pedra. De acordo com a classificação da norma ABNT NBR 6502/1995, sua composição consta de:

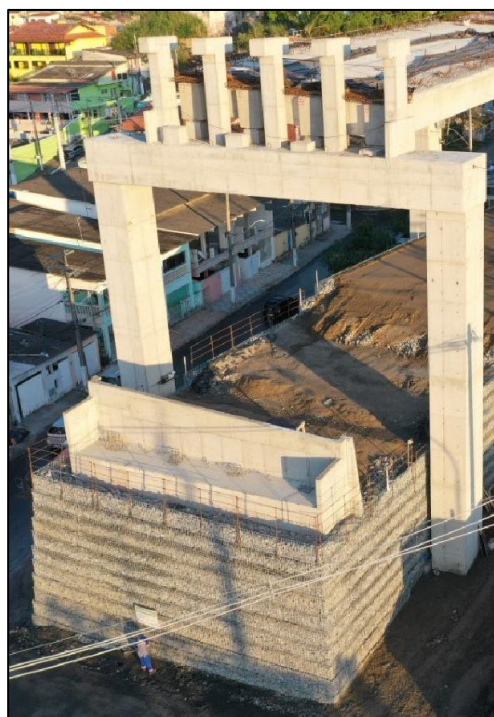
Tabela 2. Composição do pó de pedra utilizado no aterro compactado

Fração	Composição	Fração	Composição
Pedregulho médio	5,8%	Areia fina	16,1%
Pedregulho fino	26,8%	Silte	9,5%
Areia grossa	23,1%	Argila	0,4%
Areia média	18,3%		

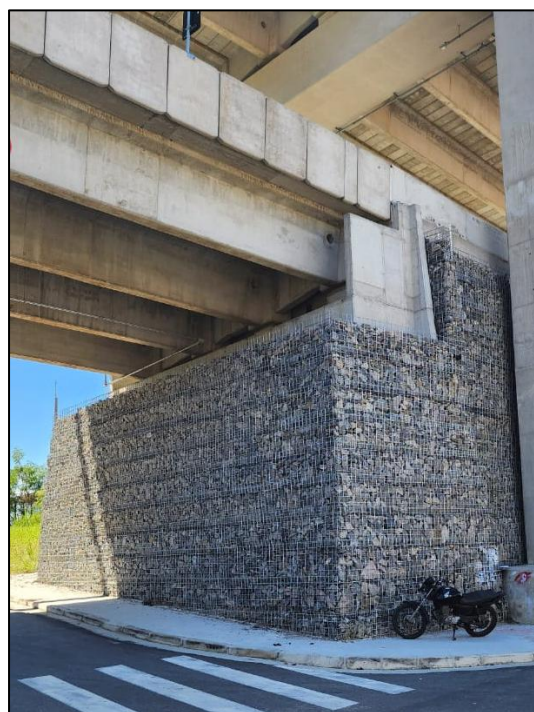
A umidade ótima do material é de 6,6% e corresponde a um peso específico de $18,6 \text{ kN/m}^3$. Com relação aos parâmetros de resistência, tendo em vista os resultados do ensaio de cisalhamento direto realizado com o material nas condições as mais próximas possíveis da situação detectada no ótimo de compactação, foram obtidos coesão efetiva de 38 kPa e ângulo de atrito efetivo de 39° . Para o projeto, foram adotados parâmetros minorados, com coesão efetiva de 5 kPa, ângulo de atrito efetivo de 32° e peso específico de 18 kN/m^3 .

4 ENCONTROS PORTANTES

A solução para a travessia sobre o Acesso CTEEP consta de um viaduto apoiado em encontros portantes. Nesse caso, as longarinas do viaduto são apoiadas diretamente em sapatas ou consoles instalados na própria estrutura de solo reforçado, eliminando as fundações e pilares do viaduto. A Figura 6 mostra o console de apoio das longarinas do viaduto durante sua execução e com a obra em operação.



(a)



(b)

Figura 6. Apoio portante, durante a execução da obra (a) e na operação da via (b).

A sapata para apoio das vigas tem 2 m de largura com comprimento igual à largura da plataforma e a tensão vertical média na base da sapata é de 180 kN/m^2 . Na lateral do bloco atua ainda uma tensão horizontal de 31 kN/m^2 resultante do empuxo do solo e esforços de frenagem e retração (resultante de todas as forças horizontais dividido pela altura do bloco). A Figura 7 ilustra uma das análises de estabilidade global desenvolvidas para o estudo do apoio portante.

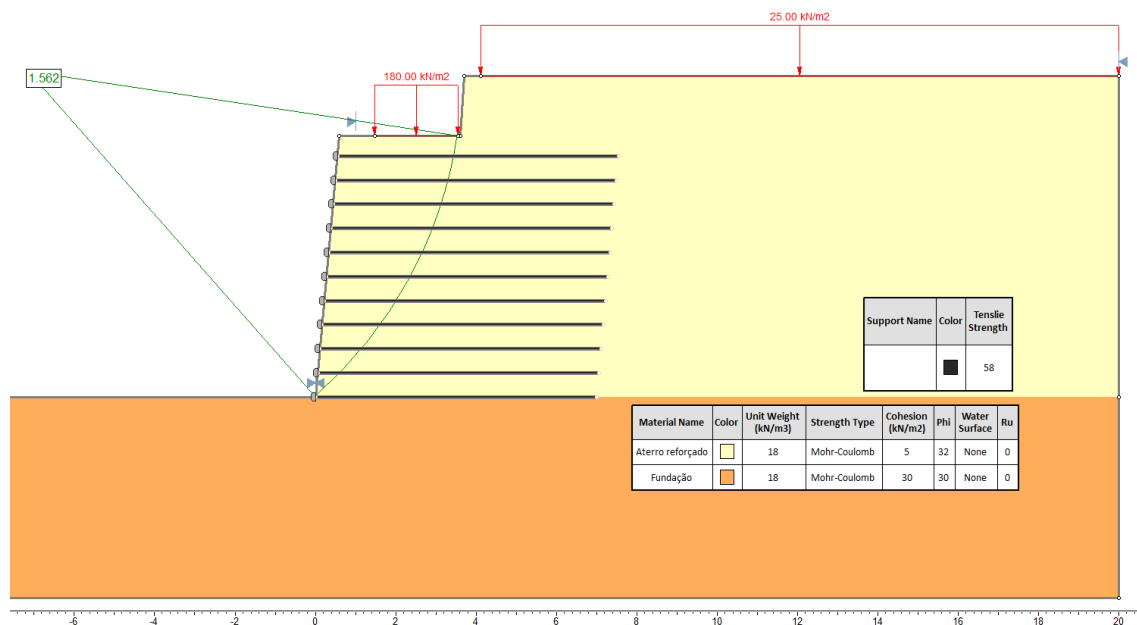


Figura 7. Análise de estabilidade global para o apoio portante com Fator de Segurança de 1,56. (eixos “x” e “y” em metros)

5 CONCLUSÕES

A substituição da pista inferior de um viaduto em sanduiche por uma pista apoiada em aterro reforçado com faces em tela metálica galvanizada mostrou-se uma alternativa viável técnica e economicamente para a implantação da Rodovia dos Tamoios no Contornos Sul, na Cidade de São Sebastião - SP. A solução permitiu a diminuição dos prazos previstos para a obra, bem como a utilização de material de aterro excedente proveniente das escavações dos túneis da mesma obra. A utilização de reforços compostos por geogrelhas de poliéster e o rigoroso controle de compactação dos aterros resultou em muros com baixa deformabilidade, que permitiram a sua execução em locais com espaço exíguo e a implantação de um viaduto portante em um trecho da obra, apoiado diretamente no aterro reforçado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995). NBR 6502. *Solos e rochas - Terminologia*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 16920-1. *Muros e taludes em solos reforçados – Parte 1: Solos reforçados em aterros*. Rio de Janeiro.
- Ehrlich, M.; Becker, L. *Muros e taludes de solo reforçado: projeto e execução*. Oficina de Textos, 2009.
- Gerscovich, D.; Saramago, R.; Danziger, B. R. *Contenções: teoria e aplicações em obras*. Of. de Textos, 2016.
- Schmidt, C. F. et al. Solo reforçado como complemento de cortina atirantada parcialmente executada. COBRAE 2021 – VIII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, 2021. *Anais*.
- Ehrlich, M. Análise de muros e taludes de solos reforçados. Geossintéticos’ 99–1º Simpósio Sul-Americano de Geossintéticos–3º Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, *Anais* v. 2, p. 73-84, 1999.