

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/147

Análise da Implementação de Estrutura de Contenção em Solo Reforçado no Contorno de São Sebastião - SP

José Guilherme Sacilotto
Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, Brasil, josesaciloto@outlook.com

Paulo José Rocha de Albuquerque
Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, Brasil, pjra@unicamp.br

Cristina Francischetto Schmidt
Huesker Ltda., São José dos Campos - SP, Brasil, cristina@huesker.com.br

RESUMO: O trabalho tem por objetivo analisar as vantagens da implementação de uma estrutura de contenção em solo reforçado, por meio da avaliação das condições da obra do Contorno de São Sebastião, SP. A implantação da estrutura de contenção tem como objetivo dar suporte à pista de rolamento na chegada da estrada à cidade de São Sebastião, sendo constituída por face com telas metálicas, preenchidas com pedras de diâmetro equivalente mínimo de 0,25 m, e utilização de geogrelhas de poliéster como elementos de reforço. Para o dimensionamento do muro, foram realizadas três tipos de análise de estabilidade: estabilidade externa, de maneira a evitar o deslizamento e tombamento da massa de solo reforçado, assim como a verificação das tensões na base e o rompimento do solo da fundação; estabilidade interna, através do método de dimensionamento de Ehrlich e Mitchell (1994), com o qual foi possível determinar o comprimento necessário das geogrelhas, assim como os requisitos mínimos para que tais geossintéticos pudessem ser aplicados, como resistência à tração disponível, módulo de rigidez e deformação máxima dos reforços e, por fim, estabilidade global, realizada através de análises de equilíbrio limite com o uso de *software* de busca automática da superfície crítica de ruptura. Além do mais, foi avaliada a pegada de carbono da estrutura de contenção em solo reforçado em um trecho modular, através da determinação da massa de carbono equivalente, obtida por meio de declarações ambientais de produto (DAP) e do consumo de materiais. A partir dos dados obtidos em obra, observou-se que houve um ganho significativo de tempo com a adoção do sistema de muros de solo reforçado, e elevada diminuição das emissões de carbono equivalente da solução adotada quando comparada à solução inicial em concreto armado, evidenciando as vantagens da utilização de muros em solo reforçado.

PALAVRAS-CHAVE: Reforço, geossintéticos, solo mole, pegada de carbono, geogrelha

ABSTRACT: The objective of the study is to analyze the advantages of implementing a reinforced soil retaining structure by evaluating the conditions at the Contorno de São Sebastião construction site in São Paulo, Brazil. The implementation of the retaining structure aims to provide support to the roadway upon its arrival in São Sebastião, consisting of a facing with metal meshes filled with stones of a minimum equivalent diameter of 0.25 m, and the use of polyester geogrids as reinforcement elements. For the wall design, three types of stability analyses were conducted: external stability, aimed at preventing sliding and tilting of the reinforced soil mass, the verification of tensions at the base and the soil foundation failure.; internal stability, using the Ehrlich and Mitchell (1994) design method to determine the necessary geogrid length and minimum requirements for their application, such as available tensile strength, stiffness modulus, and maximum deformation of the reinforcements; and global stability, performed through limit equilibrium analyses using automatic search software to find the critical rupture surface. Additionally, the carbon footprint of the reinforced soil retaining structure was assessed in a modular section by determining the equivalent carbon mass obtained through Environmental Product Declarations (EPDs) and material consumption. Based on the on-site data, a significant time gain was observed with the adoption of the reinforced earth retaining structure, along with a substantial reduction in equivalent carbon emissions compared to the initial reinforced concrete solution, demonstrating the advantages of using reinforced soil walls.

KEYWORDS: Reinforcement, geosynthetics, soft soil, carbon footprint, geogrid

1 INTRODUÇÃO

As estruturas de contenção são elementos de extrema importância na engenharia civil, em especial nas obras de infraestrutura, como estradas, rodovias, barragens e portos. Sua função primordial é resistir aos empuxos de terra, de modo a permitir o aproveitamento da região adjacente a tais estruturas ou do terrapleno. Ao longo de um extenso período, as obras de contenção foram confeccionadas em concreto, e representaram a única opção disponível. Contudo, a demanda pela execução de construções econômicas com alturas elevadas impulsionou o desenvolvimento de novas tecnologias, como solo grampeado, solo atirantado, além das estruturas de contenção em solo reforçado (ECSR) que, usualmente, são constituídas por dois principais elementos, sendo: elementos de faceamento e elementos de reforço, usualmente geossintéticos.

A utilização de geossintéticos teve início em meados de 1950, com a utilização de geotêxteis tecidos em obras para proteção antierosiva e erosões marítimas (Vertematti, 2015). Posteriormente, ocorreu a primeira aplicação de geotêxteis não tecidos em obras civis, nos Estados Unidos, para recapamento asfáltico.

Com o advento de novas tecnologias e o início da construção de grandes obras, foram criados grupos de estudos a fim de desenvolver normas específicas para a aplicação dos novos materiais. No Brasil, os primeiros registros de aplicações de geossintéticos datam de 1971, para reforço de aterros sobre solos de baixa capacidade de carga, majoritariamente em obras viárias (Vertematti, 2015). Nas décadas posteriores, houve o surgimento de métodos de dimensionamento de obras com utilização de geossintéticos, como o método de Ehrlich e Mitchell (1994), descrito no presente trabalho. Em virtude dessas razões, foram concebidas diversas categorias de produtos, com aplicações nos mais diversos setores, como hidráulica, geotecnia, mineração, engenharia ambiental, assim como infraestrutura viária.

A obra dos Contornos de Caraguatatuba e São Sebastião - SP, iniciada no ano de 2015, tem como finalidade aliviar o trânsito de passagem do sistema viário interno desses municípios. No entanto, tal empreendimento foi paralisado em 2018 e retomado em outubro de 2021 pela construtora EGTC Infra. O trecho de estudo dos Contornos encontra-se na região da Topolândia, no município de São Sebastião, constituída por uma extensa camada de solo mole, em terreno plano e costeiro. Para finalizar a obra no período previsto, foi elaborada uma solução alternativa com muro de contenção em solo reforçado, cuja função é dar suporte à pista de rolamento, localizada no terrapleno do talude contido por tal muro.

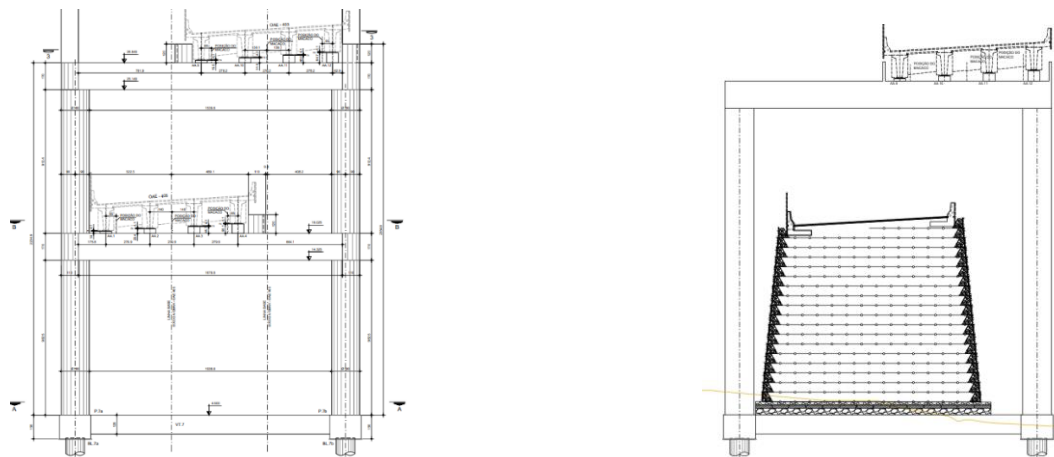


Figura 1 – Seção transversal original em beliche e alternativa com pista inferior em solo reforçado. Fonte: Autores

2 DESCRIÇÃO DA OBRA

A solução original da chegada dos contornos ao litoral de São Sebastião considera uma conexão entre um túnel e um viaduto em beliche, inicialmente concebido em concreto armado, o qual é constituído por uma pista superior e uma pista inferior (Figura 1), com o intuito de isolar os diferentes sentidos de fluxo (chegada e partida), com fundações em sapata e estacas escavadas de grande diâmetro. Tal conexão está situada em uma região denominada Topolândia, caracterizada por uma grande concentração de comunidades urbanas e áreas industriais, o que impõe notáveis desafios à execução de projetos de grande magnitude.

Contudo, em decorrência de uma descontinuidade na obra, o cronograma foi reajustado e, por esta razão,

o prazo de entrega para a construção da nova rodovia foi alterado. Assim, para que todas as tarefas fossem realizadas em conformidade com o novo planejamento, foi realizado um projeto alternativo para os viadutos em beliche, o qual consiste na substituição da pista inferior, apoiada em estrutura de concreto armado, por uma estrutura de contenção em solo reforçado apoiada sobre colunas *Deep Soil Mixing* (DMS) (Figura 1). Tal estrutura de contenção tem altura máxima de 12 m, inclinação de face de 10 V:1 H, além de ser faceada por módulos constituídos por telas metálicas eletrosoldadas galvanizadas, reforçada por três tipos de geogrelhas de poliéster, com resistências à tração disponível iguais a 30 kN/m, 44 kN/m e 63 kN/m, espaçadas verticalmente em 0,6 m (S_V).

3 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

As características do subsolo foram determinadas por meio de ensaios *in-situ* do tipo *Standard Penetration Test* (SPT), os quais indicaram perfis heterogêneos. Nas regiões próximas ao desemboque do túnel, foi possível observar, de modo geral, uma camada superficial de solo de alteração, com valores de N_{SPT} entre 32 e 39 golpes, e extensão variável, atingindo profundidades de até 3 m, seguido de uma camada de gnaise, de espessura variável, com profundidade de até 12 metros e com valores de RQD variando entre 35% e 100% e recuperação entre 50% e 100%. Ademais, nos trechos à jusante, observaram-se camadas significativas de argilas marinhas de muito mole a mole e extensão variável, atingindo espessura de até 5 metros, com valores de N_{SPT} próximos e não superiores a 2 golpes.

Além do mais, o material constituinte do aterro é classificado como areia artificial (pó de pedra) bem graduada (Figura 2), tendo por base a classificação da NBR 6502:2022, sendo os parâmetros de resistência determinados por meio de ensaio de cisalhamento direto drenado, com amostra indeformada, tensões aplicadas de 50, 100, 200 e 400 kPa e velocidade de 0,8 mm/min, o qual resultou em coesão efetiva igual a 38 kPa e ângulo de atrito efetivo igual a 39°. Para critérios de projeto, foram considerados valores de coesão e ângulo de atrito iguais a 5 kPa e 32°, respectivamente. Esse material é resultado da britagem das rochas escavadas para construção dos túneis da obra. Por fim, as colunas DSM foram executadas com diâmetros e comprimentos variáveis, de acordo com necessidade identificada em projeto, e com dimensões de malha entre 1,90 m e 2,00 m, originando um compósito com peso específico de 18 kN/m³, ângulo de atrito efetivo igual a 30° e coesão efetiva igual a 30 kPa, de acordo com critérios de projeto, para fins de análise de estabilidade global.

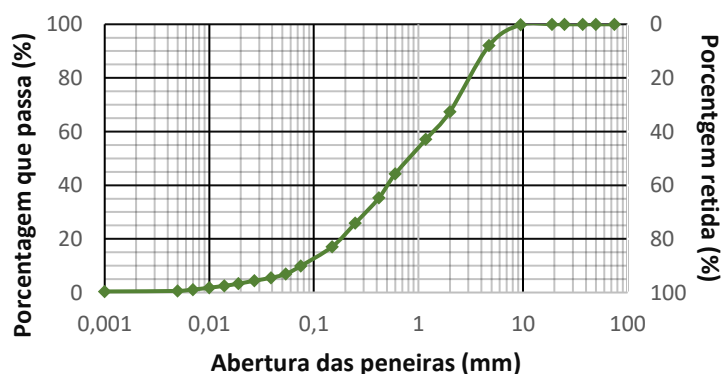


Figura 2. Curva granulométrica do material britado para aterro.

4 DIMENSIONAMENTO

Para realizar o dimensionamento da estrutura de contenção em questão, foram adotados dois parâmetros distintos para o solo: um para o aterro, e outro para o material em que a estrutura é apoiada, haja vista que no trecho analisado o muro é construído sobre colunas DSM. Assim, as características do material de aterro foram embasadas no ensaio de cisalhamento direto descrito no item 3 e em dados presentes na literatura (Marques et al., 2006), e o compósito entre solo e colunas DSM a partir da abertura da malha supracitada, com consumo de cimento de 330 kg/m³. Adicionalmente, foi considerada uma sobrecarga uniformemente distribuída, no topo do muro, igual a 25 kN/m². Os valores adotados de peso específico, coesão e ângulo de atrito estão

dispostos na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros dos solos.

	Aterro	Compósito (solo + DSM)
Peso específico (kN/m ³)	18	18
Ângulo de atrito efetivo (°)	32	30
Coesão efetiva (kPa)	5	30
K - carregamento	450	-
Ku - descarregamento	900	-
Módulo expoente - n	0,8	-

Onde: K é módulo tangente inicial para carregamento e Ku é o módulo para descarregamento do modelo hiperbólico de Duncan et al. (1980).

4.1 Estabilidade externa

A análise de estabilidade externa para as estruturas de contenção em solo reforçado considera a massa de solo reforçado como um bloco monolítico garantindo, assim, a estabilidade da zona não reforçada (Ehrlich e Becker, 2009). Dessa maneira, é necessário garantir a estabilidade da massa ao deslizamento (equação 1), tombamento (equação 2), verificação das tensões na base (equação 3) e tensão admissível de fundação, sob ação de dado empuxo aplicado pela massa de solo não reforçado. Para determinar a magnitude do empuxo citado, as teorias fundamentadas no equilíbrio limite são comumente utilizadas, a exemplo da formulação de Rankine, a qual foi utilizada neste trabalho.

$$L_r = \frac{(0,5 \cdot \gamma \cdot t g^2(45^\circ - \frac{\phi'}{2}) \cdot H^2 + q \cdot H \cdot t g^2(45^\circ - \frac{\phi'}{2})) \cdot FS}{(\gamma \cdot H + q) \cdot t g \phi'} \quad (1)$$

$$L_r = \sqrt{\frac{2 \cdot FS \cdot [(0,5 \cdot \gamma \cdot t g^2(45^\circ - \frac{\phi'}{2}) \cdot H^2 \cdot \frac{H}{3} + q \cdot H \cdot t g^2(45^\circ - \frac{\phi'}{2}) \cdot \frac{H}{2}]}{(\gamma \cdot H + q)}} \quad (2)$$

$$L_r = \sqrt{\frac{6 \cdot [(0,5 \cdot \gamma \cdot t g^2(45^\circ - \frac{\phi'}{2}) \cdot H^2 \cdot \frac{H}{3} + q \cdot H \cdot t g^2(45^\circ - \frac{\phi'}{2}) \cdot \frac{H}{2}]}{(\gamma \cdot H + q)}} \quad (3)$$

Em que: L_r é o comprimento das geogrelhas; γ é o peso específico do material de aterro;; H é a altura do muro; q é a sobrecarga aplicada no topo do muro; FS é o fator de segurança; ϕ' é o ângulo de atrito efetivo;

Outrossim, os fatores de segurança utilizados estão em conformidade com a NBR 16920-1:2021, a qual estabelece que os fatores de segurança globais mínimos considerados devem ser iguais a 1,5 para deslizamento, 2,0 para tombamento e 2,0 para a tensão admissível de fundação, avaliado no bordo mais carregado.

4.2 Estabilidade interna

A análise de estabilidade interna para as estruturas de contenção em solo reforçado consiste no cálculo dos esforços aplicados em cada uma das camadas de reforço, para que seja possível determinar as características mínimas apresentadas pelas geogrelhas.

Para tal, utilizar-se-á a metodologia proposta por Ehrlich e Mitchell (1994), a qual possui como premissa o comportamento tensão x deformação da massa de solo reforçado e leva em consideração aspectos como a relação constitutiva do solo e as propriedades da interface solo-reforço. Adicionalmente, deve-se levar em consideração a análise de estabilidade ao arrancamento, a qual é baseada no atrito entre o solo e o reforço. Em decorrência disso, há o surgimento de uma componente de resistência passiva do solo em relação aos elementos transversais. Em ambos os casos, deve-se respeitar os fatores de segurança iguais a 1,5

apresentados pela NBR 16920-1:2021. O cálculo da máxima tensão de tração no reforço ($T_{m\acute{a}x}$) (Ehrlich e Becker, 2009) e a resistência ao arrancamento por unidade de comprimento transversal do reforço (P_r) (Christopher et al., 1990) são dados por:

$$T_{m\acute{a}x} = S_V \cdot K_r \cdot \sigma'_z \quad (4)$$

Onde: S_V é o espaçamento vertical entre as geogrelhas; K_r é o coeficiente de empuxo residual ao final da construção; σ'_z é a tensão vertical no ponto de interesse.

$$P_r = 2(0,9 \cdot \tan(\phi')) \cdot \alpha \cdot \sigma'_z \cdot L_e \geq 1,5 \cdot T_{m\acute{a}x} \quad (5)$$

Onde: α é o fator de correção do efeito de escala ($\alpha = 1,0$); L_e é o comprimento de reforço na zona resistente; ϕ' é o ângulo de atrito efetivo.

4.3 Estabilidade global

A análise de estabilidade global contempla a verificação da estabilidade do maciço que contém a estrutura do muro de contenção em solo reforçado, por meio da premissa de que esta pode se deslocar como um corpo rígido no interior do maciço. Para tal, empregam-se os métodos de equilíbrio limite, que são fundamentados na subdivisão da superfície de ruptura em fatias, levando em consideração os esforços pertinentes a cada um desses segmentos. Dessa forma, ao término da análise, torna-se possível estabelecer a relação entre os esforços aplicados e os esforços resistentes na cunha. A análise foi feita por meio de *software* de busca automática da superfície crítica de ruptura através do método de Morgenstern & Price (1965).

5 PEGADA DE CARBONO

A redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) é uma tarefa vital que precisa ser abordada em escala global para que seja possível mitigar os impactos negativos das mudanças climáticas. Para quantificar as emissões, utilizam-se dois parâmetros, denominados energia incorporada e carbono incorporado. A energia incorporada é toda a energia utilizada para produzir um produto, desde a extração da matéria-prima, o transporte e o processo de produção. Cada gás de efeito estufa recebe um *Global Warming Potencial* (GWP), e para possibilitar comparações, todos os GEE emitidos são convertidos em seu equivalente em dióxido de carbono, CO₂. Para calcular o carbono incorporado, toda a energia usada durante o processo de produção é detalhada por fonte de energia e as emissões de GEE produzidas por esse tipo de fonte de energia ou combustível (*UK Department of Energy & Climate Change*), que são então convertidas para o equivalente em CO₂.

Para avaliar o desempenho de cada uma das soluções apresentadas para a obra dos Contornos de Caraguatatuba e São Sebastião - SP, foram realizados cálculos de estimativa de GWP gerado pelo fornecimento de matérias primas, transporte e manufatura dos materiais utilizados na obra. Tais valores são obtidos por meio das Declarações Ambientais de Produtos (EPD's), fornecidas pelos fabricantes dos produtos que constituem as soluções. Os demais materiais, como rachão e areia, tiveram seus valores estimados por meio do *Inventory of Carbon & Energy* (ICE), da Bath University. É importante frisar que, a limitação adotada em relação às etapas deve-se à disponibilização dos dados fornecidos pelos fabricantes, os quais, muitas vezes, não contemplam todas as etapas (Tabela 2).

Tabela 2. GWP dos materiais utilizados.

Material	GWP	Fonte
Geogrelha 1	1,44 kg CO ₂ eq/m ²	HUESKER Synthetic GmbH. EPD Fortrac T, 2021
Geogrelha 2	1,92 kg CO ₂ eq/m ²	
Geogrelha 3	2,10 kg CO ₂ eq/m ²	
Geotêxtil tecido	0,63 kg CO ₂ eq/m ² (137 g)	HUESKER Synthetic GmbH. EPD Stabilenka, 2021
Cimento	384 kg CO ₂ eq/t	Votorantim Cimentos S.A, 2023
Material	GWP	Fonte

Aço	0,79 kg CO ₂ eq/kg	Arcelor Mittal Brasil, 2018
Galvanização	1,71 kg CO ₂ eq/kg	American Galvanizers Association, 2022
Agregado	10,4 kg CO ₂ eq/m ³	ICE Database, 2011
Areia	0,0051 kg CO ₂ eq/kg	ICE Database, 2011

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 3 são mostrados os resultados da análise de estabilidade externa, obtidos a partir da formulação de Rankine. Com tal formulação, foi possível determinar o comprimento necessário das geogrelhas para a estabilização da massa de solo reforçado, para os fatores de segurança mínimos exigidos em norma. Adicionalmente, para a determinação da tensão admissível de fundação, utilizou-se a formulação proposta por Sokolovski (1960) e Brinch Hansen (1961).

Tabela 3. Análise de estabilidade externa.

Análise de estabilidade	Comprimento das geogrelhas (m)
Deslizamento	4,88
Tombamento	5,97
Verificação das tensões na base	7,31

Outrossim, os valores referentes à análise de estabilidade interna estão explicitados na Tabela 4, com dados acerca da máxima tensão de tração no reforço ($T_{m\max}$) e resistência ao arrancamento por unidade de comprimento transversal do reforço (P_r) para cada uma das camadas de geogrelhas. Em razão da altura máxima do muro, foi necessário a inserção de 20 camadas de geogrelhas com espaçamento (S_v) igual a 60 cm (Tabela 4).

Tabela 4. Análise de estabilidade interna.

Camada de reforço	Geogrelha	K_r	σ'_z (kN/m)	$T_{m\max}$ (kN/m)	$T_{dm\max}$ (kN/m)	L_e (m)	P_r (kN/m)
1	1	0,4560	36	9,79	14,69	2,13	85,77
2	1	0,3558	47	9,95	14,92	2,40	125,93
3	1	0,2931	57	10,09	15,14	2,68	172,71
4	1	0,2500	68	10,23	15,35	2,95	226,12
5	1	0,2186	79	10,36	15,54	3,22	286,15
6	1	0,2203	90	11,87	17,80	3,49	352,80
7	1	0,2241	101	13,53	20,29	3,77	426,07
8	1	0,2274	111	15,20	22,80	4,04	505,97
9	1	0,2302	122	16,88	25,32	4,31	592,49
10	1	0,2326	133	18,56	27,84	4,58	685,63
11	2	0,2400	144	20,71	31,07	4,86	785,40
12	2	0,2451	155	22,40	33,60	5,13	891,79
13	2	0,2428	165	24,10	36,14	5,40	1004,80
14	2	0,2440	176	25,79	38,69	5,67	1124,43
15	2	0,2450	187	27,49	41,23	5,95	1250,68
16	3	0,2504	198	29,72	44,58	6,22	1383,56
17	3	0,2511	209	31,42	47,13	6,49	1523,06
18	3	0,2516	219	33,12	49,68	6,76	1669,18
19	3	0,2522	230	34,83	52,25	7,04	1821,93
20	3	0,2526	241	36,53	54,80	7,31	1981,30

Com base nos resultados, conclui-se que as condições para ruptura e arrancamento dos reforços estão em conformidade com as características do material utilizado. Por fim, a análise de estabilidade global foi realizada por meio do método de Morgenstern & Price (1965) através de *software* computacional, resultando em um fator de segurança igual a 1,50. Para a modelagem da estrutura de contenção em solo reforçado, foram

utilizadas geogrelhas com comprimentos superiores a 7,31 m (obtido na análise de estabilidade externa), uma vez que o projeto geométrico da via estabelece uma largura da faixa de rodagem de 10,4 m, estando, dessa forma, a favor da segurança.

Os cálculos para a determinação da massa de carbono equivalente para ambas as soluções foram realizados para o quarto lote da Obra de Arte Especial (OAE) 405, com base no consumo de materiais, por meio do produto entre o GWP de cada material com o consumo do respectivo componente. Além disso, foram utilizados traços característicos para o concreto por falta de dados. Dessa maneira, tem-se que a massa de carbono equivalente para cada uma das soluções conforme as Tabelas 5 e 6.

Tabela 5. Massa de carbono equivalente da solução original.

Material	Massa de carbono equivalente (kgCO _{2e} q)
Cimento	290.384
Areia	10.237
Pedra	7.352
Aço	243.749
Total	551.722

Tabela 6. Massa de carbono equivalente da solução alternativa.

Material	Massa de carbono equivalente (kgCO _{2e} q)		
	Estrutura de contenção	Estrutura remanescente	Colunas DSM
Geogrelha 1	64.800	-	-
Geogrelha 2	26.880	-	-
Geogrelha 3	15.750	-	-
Geotêxtil	11.340	-	-
Cimento	-	28.339	814.464
Areia	-	1.028	-
Pedra	-	-	-
Agregado	136.656	732	-
Aço	237.475	19.273	-
Total	492.901	49.372	814.464

A solução alternativa para a OAE 405 apresenta uma massa de carbono equivalente superior àquela apresentada pela solução original, uma vez que o consumo de cimento é cerca de 3 vezes superior ao que o apresentado na primeira alternativa. No entanto, isto se deve à execução das colunas DSM, em razão das condições desfavoráveis do solo de fundação. Se a fundação da estrutura do solo reforçado tivesse boa capacidade de carga, sem necessidade de execução das colunas de DSM, a pegada de carbono seria menor do que a do projeto original em estrutura de concreto armado.

7 CONCLUSÃO

Para dimensionar a estrutura, foram realizadas três verificações: estabilidade externa, interna e global. A primeira análise garantiu que o bloco monolítico formado pela ECSR não se deslocasse ou tombasse horizontalmente, além de verificar as condições do solo de fundação para suportar o muro. Isso resultou em um comprimento mínimo de 7,31 m para as geogrelhas.

Além disso, a análise de estabilidade interna assegurou que cada camada de reforço suportasse as tensões geostáticas, sobrecarga prevista em projeto e a tensão induzida pela compactação. Os três tipos de geogrelhas adotados atenderam as exigências da obra.

Por fim, a análise de estabilidade global avaliou a superfície crítica e o fator de segurança do sistema. Utilizando o método de Morgenstern & Price (1965), obteve-se um FS= 1,50. Dessa maneira, por meio das três análises realizadas, confirmou-se que a configuração das geogrelhas é satisfatória para as condições da obra.

Além do mais, foi realizada comparação entre a pegada de carbono gerada para solução inicial do projeto e a ECSR, de forma a se obter a massa de carbono equivalente de cada uma das soluções. O resultado obtido para a análise evidencia uma massa de carbono equivalente de 551.722 kgCO₂ para a solução original à medida que a solução alternativa apresentou uma massa de carbono equivalente de 1.356.737 kgCO₂e. A divergência entre ambos os valores se deve à implementação das colunas DSM, representando cerca de 60% do total gerado pela solução alternativa, uma vez que o solo de fundação não apresenta condições favoráveis à obra.

Em suma, a partir dos dados expostos, evidencia-se que a implementação da estrutura de contenção no Contorno de São Sebastião – SP apresentou diversas vantagens perante comparação com a estrutura original proposta, destacando a viabilidade e a relevância das estruturas de contenção em solo reforçado no cenário nacional. A solução alternativa em solo reforçado garantiu o cumprimento do cronograma apertado da obra.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradecemos à construtora EGTC Infra pela disponibilização das informações da obra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileiras De Normas Técnicas (2021). NBR 16920. *Muros e taludes em solos reforçados - Parte 1: Solos reforçados em aterros*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileiras De Normas Técnicas (2022). NBR 6502. *Solos e Rochas - Terminologia*. Rio de Janeiro.
- Brinch Hansen, J. *The ultimate resistance of rigid piles against transverse forces*. Dansk Geotechnisk Inst. Bull, 1961. v. 12, p. 5-9. In: Clayton, C. R. I.; Milititsky, J.; Woods, R. I. *Earth pressure and Earth-retaining structures*. 2. ed. Glasgow: Blackie Academic and Professional, 1993.
- Christopher, B. R.; Gill, S. A.; Giroud, J. P.; Juran, I.; Mitchell, J. K.; Schlosser, F.; Dunncliff, J. *Reinforced soil structures, v. 1 - Design and construction guidelines*. Washington, D.C.: FHWA, 1990. Rep. n. FHWA/RD/89-043
- Department of Energy & Climate Change (2011). *The Carbon Plan: Delivering our low carbon future*. Disponível em < <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a79744ced915d07d35b5a17/3702-the-carbon-plan-delivering-our-low-carbon-future.pdf> >. Acesso em: 3 nov. 2023.
- Duncan, J. M. et al. Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soil masses. *Journal of Geotechnical Engineering*, Rep. No. UCB/GT/80-01, University of California, Berkeley, California, 1980
- Ehrlich, Maurício; Becker, Leonardo. *Muros e taludes de solo reforçado: projeto e execução*. Oficina de Textos, 2009
- Ehrlich, Maurício; Mitchell, James K. Working stress design method for reinforced soil walls. *Journal of geotechnical engineering*, v. 120, n. 4, p. 625-645, 1994
- Marques, H. C.; Ehrlich, M.; Riccio, M. V. *Parâmetros de resistência e tensão de formação por análise de elementos finitos para obras de terra com solos tropicais compactados do Brasil*. Relatório Interno. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2006.
- Morgenstern, NR u; Price, V. Eo. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, v. 15, n. 1, p. 79-93, 1965.
- Sokolovski, V. V. *Statics of soil media*. London: Butterworth, 1960. In: Clayton, C. R. I.; Milititsky, J.; Woods, R. I. *Earth pressure and Earth-retaining structures*. 2. ed. Glasgow: Blackie Academic and Professional, 1993.
- Vertematti, José Carlos. *Manual brasileiro de geossintéticos*. Editora Blucher, 2015.