

Contenção em Solo Reforçado como Alternativa a Cortina Atirantada: Redução de Prazos, Custos e Impactos Ambientais

Cristina F. Schmidt

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

Sandra V. R. Nakahara Yamana

Gerente de Engenharia, Grupo Monto, São Paulo, Brasil, sandra.nakahara@grupomonto.com.br

Emília Mendonça Andrade

Gerente de Aplicações Ambientais, Huesker Ltda., São José dos Campos, Brasil, emilia@huesker.com.br

Mateus Cardoso Reis Cleto

Gerente de Aplicações Geotécnicas, Huesker Ltda., São José dos Campos, Brasil,
mateus.cleto@huesker.com.br

RESUMO: O trabalho apresenta o caso de obra de um muro de grande altura construído em solo reforçado com geogrelhas de PVA e face em tela metálica rotulada e galvanizada. A contenção com altura de até 19 m foi necessária para implantação do pátio de estacionamento e manobra de carretas de um centro logístico localizado no município de Cajamar-SP, por conta da proximidade de uma Área de Proteção Permanente (APP). A solução original do projeto constava de uma cortina atirantada parcialmente em aterro com fundação de até 6 estacas por bloco e tirantes com comprimento livre de até 40 m. A solução alternativa em solo reforçado com geogrelhas teve como objetivo diminuir o prazo de execução e o custo da obra. Além dos benefícios econômicos e de aceleração do cronograma de execução da obra, a substituição da solução original do projeto por sistema construtivo com geossintéticos promoveu uma significativa redução da emissão de Gases de Efeito Estufa (GGEs) relacionada aos ciclos de vida dos materiais empregados em cada alternativa, demonstrada nesse trabalho através do cálculo de carbono incorporado CO₂eq para as duas opções de projeto, onde evidenciam-se as vantagens em termos de sustentabilidade alcançadas com a substituição da cortina atirantada pelo muro reforçado com geossintéticos.

PALAVRAS-CHAVE: Solo Reforçado com Geogrelha, Declaração Ambiental de Produto, Carbono Incorporado, Emissão de Gases de Efeito Estufa.

ABSTRACT: This paper presents the case of a high wall built in soil reinforced with PVA geogrids and faced with labeled and galvanized wire mesh. A wall with a height of up to 19 m was necessary for the implementation of the parking and maneuvering yard of a logistics center located in the municipality of Cajamar-SP, due to its proximity to a Permanent Protection Area (PPA). The project's original solution consisted of an anchored wall partially in fill with a foundation of up to 6 piles per block and anchors with a free length of up to 40m. The alternative solution in geogrid-reinforced soil aimed to reduce the execution time and cost of the work. In addition to the economic benefits and speeding up the construction schedule, replacing the original project solution with a geosynthetic construction system led to a significant reduction in Greenhouse Gas Emissions (GGEs) related to the life cycles of the materials used in each alternative. This is demonstrated in this paper by calculating the embodied carbon CO₂eq for the two project options, which shows the advantages in terms of sustainability achieved by replacing the anchored wall with the geosynthetic-reinforced wall.

KEYWORDS: Reinforced Wall with Geogrid, Environmental Product Declaration, Carbon Footprint, Greenhouse Gas Emission.

1 INTRODUÇÃO

Em 2020, uma grande rede de lojas de materiais de construção iniciou as atividades operacionais de um novo centro de distribuição em Cajamar, cidade próxima a São Paulo, em uma estrutura de 100 mil m². Uma vez que a construção foi contratada no modelo built-to-suit, a sobrecarga de piso indicada pelo cliente para projeto foi de 60 kN/m² no galpão e de 20 kN/m² para o pátio de caminhões, sendo essa última a de maior influência na contenção. Para implantação do pátio das docas de caminhões, foi necessária a execução de uma contenção de grande altura em encosta com inclinação de até 40°. O projeto original previa a implantação de muro com face em concreto armado, estaqueado e atirantado, com altura máxima de 17,5 m e até 8 linhas de tirantes por seção. A Figura 1 mostra a seção transversal de maior altura do projeto original em cortina atirantada.

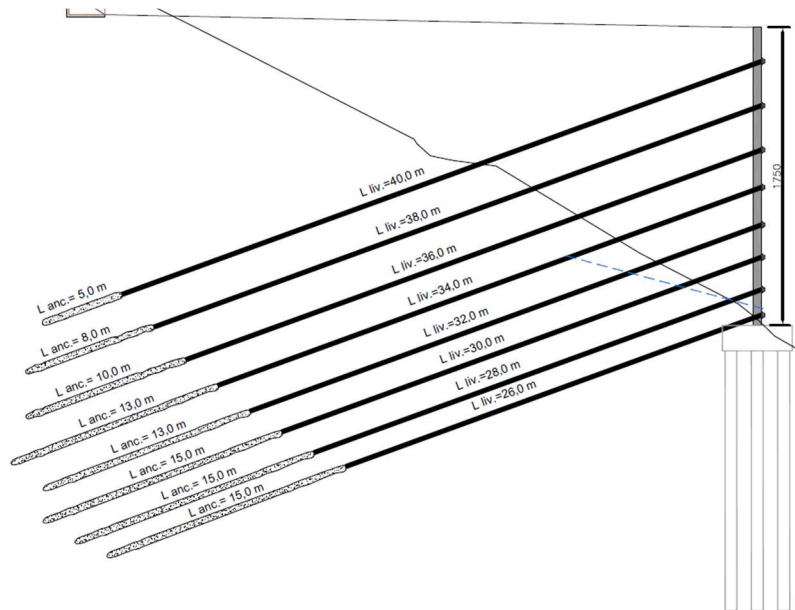


Figura 1 – Seção mais alta do projeto original.

No total, o projeto era composto por 109 estacas escavadas com diâmetros de 50 a 70 cm com comprimento de 6 m para cargas de trabalho entre 39 tf e 77 tf, 117 tirantes com comprimento livre entre 11 m e 40 m e comprimento de ancoragem entre 5 m e 15 m para cargas de trabalho de 35 a 100 tf e drenos horizontais profundos (DHPs) com comprimento de 12 m. O paramento da cortina em concreto armado foi previsto com espessura de 30 cm. Essa alternativa traz um grande consumo de aço e de concreto, pela natureza e quantitativo dos materiais empregados. Em geral, a execução de cortinas atirantadas parcialmente em aterro tem baixa produtividade e maior prazo de construção, pois a praça de compactação não fica totalmente desimpedida para a execução do aterro devido à presença dos tirantes.

Como alternativa, foi executado um muro em solo reforçado com geogrelhas, visando principalmente a redução de custos e do prazo de execução. Posteriormente, verificou-se que mudança do tipo de contenção promoveu uma significativa redução da emissão de Gases de Efeito Estufa (GGEs) relacionada aos ciclos de vida dos materiais empregados em cada alternativa.

2 PROJETO ALTERNATIVO EM SOLO REFORÇADO COM GEOGRELHAS

O muro de contenção apresenta extensão de aproximadamente 180 m, altura total de até 19 m e área de face de 1.858 m², executado em solo reforçado com geogrelhas de PVA e face em tela metálica eletrosoldada rotulada e galvanizada preenchida com rachão. A Figura 2 mostra a seção de maior altura do projeto executado.

O solo local é composto por solos residuais jovens siltosos e argilosos compactos a muito compactos. Em alguns locais existem camadas de aterro lançadas sobre o terreno original que compõem os taludes do entorno da área onde foi executado o muro de contenção e o futuro patamar. Na região da fundação do muro as sondagens mostram camadas de solos residuais com grau de alteração decrescente com a profundidade. O nível d'água encontra-se em cota bastante profunda. A vistoria de campo por geólogo especializado identificou que as escavações executadas expõem solos de alteração de metapelitos (ritmitos amarelados e arroxeados) da Formação Estrada dos Romeiros que não apresentam mica e tampouco sericita na sua composição. As

descontinuidades, acamamento e foliação do maciço apresentam-se favoráveis à estabilidade do talude de corte e do solo de apoio da contenção.

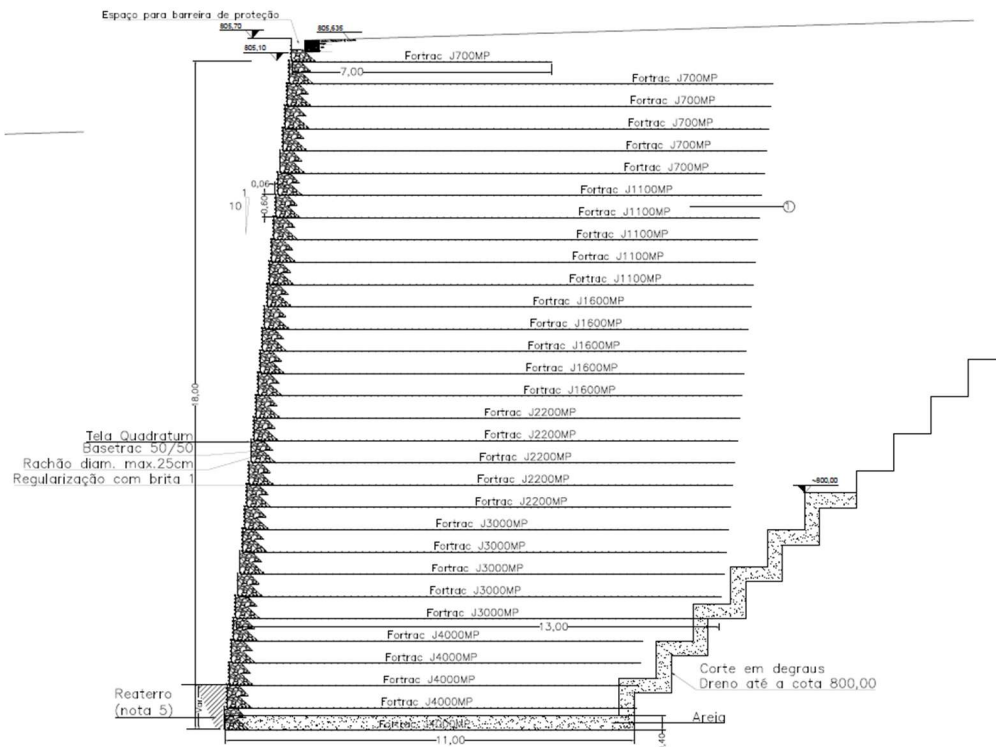


Figura 2 – Seção transversal de maior altura de solo reforçado com geogrelhas.

Para a execução dos aterros reforçados foram utilizados materiais de primeira categoria provenientes das escavações feita na própria obra, areias siltsas e siltes arenosos inorgânicos não plásticos. Estes solos quando compactados com grau de compactação mínimo de 98% do Proctor Normal e umidade ótima $\pm 2\%$ são bastante rígidos e normalmente apresentam CBR acima de 10%, baixa expansão, ângulos de atrito superiores a 30° e coesão aparente elevada devido a presença de finos e sucção. Para o dimensionamento dos muros em solo reforçado foi adotado um ângulo de atrito de 30° e coesão de 20 kPa, garantindo assim um dimensionamento bastante seguro, mesmo sem a realização de ensaios específicos de resistência ao cisalhamento. Para o solo residual maduro ou aterros medianamente compactos do maciço contido foi considerado um ângulo de atrito minorado de 28° e coesão de 15 kPa. Para a base do muro, o solo residual compacto com ângulo de atrito de 35° e coesão de 30 kPa.

O reforço do maciço se deu através de geogrelhas de PVA com resistências à tração característica entre 35 kN/m e 200 kN/m, deformação máxima de 5% na resistência à tração característica e comprimentos de até 13 m no trecho central de maior altura, com 19 m, incluindo o embutimento da base no terreno natural.

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 dos reforços 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.

A Figura 3 apresenta as curvas de mobilização da tração em função da deformação típicas para geogrelhas de poliéster, mais comuns no mercado, e as de PVA utilizadas nesse projeto. As geogrelhas de PVA, por serem mais rígidas, mobilizam maior parcela de resistência à tração quando comparadas com as geogrelhas de poliéster. Por exemplo, para uma deformação de 4%, as geogrelhas de PVA mobilizam cerca de 75% de sua máxima resistência à tração, enquanto as geogrelhas de poliéster mobilizam apenas cerca de 40% da máxima resistência à tração para essa mesma deformação. Com relação ao comportamento de longo prazo, as geogrelhas de PVA se mostram menos suscetíveis à fluência, resultando em maior resistência disponível e menores deformações durante a vida útil da obra, quando comparadas às geogrelhas de poliéster.

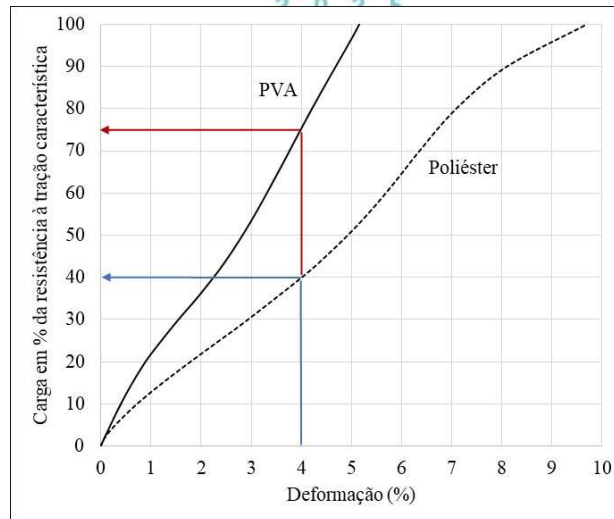


Figura 3. Curvas típicas de mobilização da resistência à tração para geogrelhas de poliéster e de PVA.

De acordo com a norma NBR 16920-1: *Muros e taludes em solos reforçados Parte 1: Solos reforçados em aterros*, o fornecedor deve apresentar ao projetista e ao cliente a curva de carga por unidade de largura versus deformação obtida em ensaios de tração de curto prazo, a curva de carga por unidade de largura versus deformação obtida em ensaios de tração de longo prazo (curvas isócronas), os fatores de redução e o fator de segurança de incertezas devidamente certificados. É importante ressaltar que essas informações são específicas para cada fabricante e para cada produto de um mesmo fabricante.

Para as contenções em solo reforçado com geogrelha que apresentam elementos especiais de face (por exemplo, tela metálica, bloco segmental, placa de concreto ou gabião) cada fornecedor oferece seus próprios sistemas construtivos, que incluem os reforços e os elementos de face. Na obra em questão, como elemento de face foram utilizados painéis de tela metálica de com 250 cm de largura por 60 cm de altura livre, preenchidos com pedras. 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, não sendo preciso nenhum tipo de forma ou escoramento adicional. Para facilitar o transporte e o manuseio das telas metálicas, o sistema conta com uma rótula exclusiva que permite que as telas sejam carregadas dobradas e instaladas na obra na posição final através de montagem manual com travamento de ganchos de aço. Uma vantagem executiva desse sistema é a possibilidade de preenchimento da face com pedras de forma mecanizada, conforme Figura 4.

A estrutura das telas metálicas 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. A barra com diâmetro de 8 mm da tela frontal apresenta menor risco de danos por vandalismo.



Figura 4. Módulo metálico fechado para o transporte, montagem dos módulos de face na obra e preenchimento mecanizado com rachãozinho na face.

3 IMPACTOS AMBIENTAIS DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

A produção de materiais de construção convencionais pode causar impactos ambientais significativos, incluindo emissões de gases de efeito estufa, consumo intensivo de energia e recursos naturais, geração de resíduos e impactos na biodiversidade. Esses impactos destacam a necessidade de desenvolver novas tecnologias construtivas e aplicar análises preditivas para produzir materiais mais ecoeficientes e reduzir esses impactos. (Passuelo et al., 2014). A aplicabilidade da Análise do Ciclo de Vida (ACV) na quantificação de impactos ambientais de materiais de construção inovadores tem sido comprovada por meio de estudos de caso comparativos, como demonstrado por Silva e Silva (2000).

A escolha dos materiais de construção afeta todos os aspectos da pegada de carbono de um edifício. Só a indústria siderúrgica é responsável por 7,2% das emissões globais de gases de efeito estufa, das quais 55% vão para o setor de ambiente construído. O impacto de diferentes materiais pode ser visualizado na Figura 5.

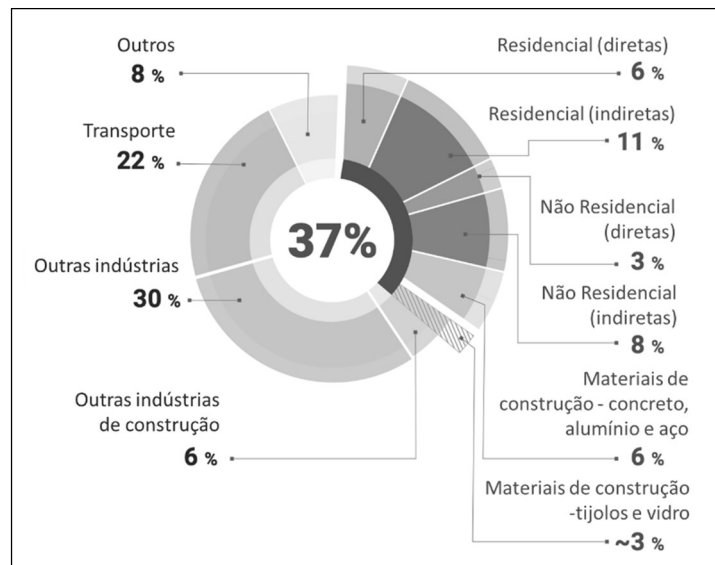


Figura 5 - Participação global das emissões de CO2 operacionais e de processo de edifícios e construção, em 2021 (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, 2022).

O carbono incorporado nos edifícios necessita de medidas imediatas para evitar prejudicar as reduções de carbono obtidas a partir da eficiência energética e uma abordagem de ciclo de vida completo da construção é essencial para maximizar a sustentabilidade. A análise da pegada de carbono e dos impactos ambientais dos materiais de construção pode abranger diferentes escopos de emissão de GEE (gases de efeito estufa), dependendo da abordagem adotada na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), podendo ser abordada por meio da análise incluindo as emissões diretas (Escopo 1), as emissões indiretas associadas à energia adquirida e consumida (Escopo 2) e outras emissões indiretas ao longo do ciclo de vida do produto (Escopo 3), de acordo com os padrões definidos por WRI, WBCSD (2004). Estudos realizados na última década, como a publicação de Fraser et al. (2012) e Bizjak e Lenart (2018), demonstram significativa redução de impacto ambiental com a aplicação de soluções alternativas em substituição a soluções convencionais na construção de estruturas de contenção, especialmente quanto à emissão de gases de efeito estufa e potencial de aquecimento global, chegando a uma redução de 84%. Fraser (2012) referencia estruturas de contenção de altura até 3 m e faz a comparação entre um sistema em solo reforçado com face verde e um muro a flexão de concreto.

5 QUANTIFICAÇÃO DO CARBONO INCORPORADO

Para avaliar e comparar o desempenho ambiental entre a solução de solo reforçado adotada na obra e o projeto original em cortina atirantada, foi realizada uma análise focada no Potencial de Aquecimento Global, quantificando o carbono incorporado (ECO2) total de cada cenário. A abordagem metodológica partiu do levantamento dos quantitativos totais de materiais de construção, conforme especificado em projeto para as duas alternativas. Em seguida, os coeficientes de emissão de ECO2, expressos em kgCO2eq por unidade de material, foram obtidos a partir de fontes de dados reconhecidas, conforme mostrado pela Tabela 1. Foram



priorizados os dados de Declarações Ambientais de Produto (EPDs), fornecidas pelos próprios fabricantes de materiais industrializados como aço, geogrelhas e geotêxteis, por oferecerem valores verificados do ciclo de vida dos produtos. Para materiais como concreto, areia, agregados e madeira, foram utilizados valores consolidados de bases de dados públicas.

Tabela 1. ECO2 referentes à produção dos materiais empregados nas duas alternativas estudadas.

Material	Referência	ECO2	
		T=35 kN/m	1,30E+00 kgCO2eq./m ²
Geogrelhas de PVA $\varepsilon = 5\%$	Huesker Synthetic GmbH. EPD Fortrac MDT, 2021	T=55 kN/m	1,44E+00 kgCO2eq./m ²
		T=80 kN/m	1,92E+00 kgCO2eq./m ²
		T=110 kN/m	2,10E+00 kgCO2eq./m ²
		T=150 kN/m	2,64E+00 kgCO2eq./m ²
		T=200 kN/m	2,20E+00 kgCO2eq./m ²
Concreto	GCCA Industry EPD Tool for Ce- ment and Concrete, 2024	2,72E+02 kgCO2eq/t	
Aço	Arcelor Mittal Brasil, 2018	7,86E+02 kgCO2eq/t	
Galvanização	American Galvanizers Association, 2022	3,30E+02 kgCO2eq/t	
Agregado	ICE Database, 2024	4,93E-03 kgCO2eq/kg	
Geotêxtil	Huesker Synthetic GmbH. EPD Stablenka, 2021	3,59E+00 kgCO2eq/m ² (780g)	
Areia	ICE Database, 2024	4,93E-03 kgCO2eq/kg	
Madeira	ICE Database, 2024	2,50E-01 kgCO2eq/kg	

A análise foi conduzida sob a fronteira *cradle-to-gate* (A1-A3), que compreende as emissões desde a extração da matéria-prima até a saída do produto da fábrica. Esta delimitação foi adotada em razão da indisponibilidade de dados completos de alguns fornecedores para as fases subsequentes do ciclo de vida, como transporte e instalação, garantindo assim uma base de comparação consistente entre os materiais. Adicionalmente, com o objetivo de focar a análise nos materiais que diferenciam os sistemas, elementos considerados equivalentes para todas as alternativas, como o transporte e a compactação do solo local, não foram incluídos nos cálculos comparativos. Essa metodologia permitiu isolar o impacto relativo dos materiais específicos de cada tecnologia de contenção, fornecendo um indicador claro do potencial de redução de emissões.

O cálculo do carbono incorporado total para cada alternativa foi realizado multiplicando-se o quantitativo de cada material pelo seu respectivo fator de emissão de ECO2. Foi necessário realizar a conversão de unidades para compatibilizar os dados, uma vez que os quantitativos de projeto, majoritariamente em metros cúbicos (m³), diferiam das unidades dos fatores de emissão, que são frequentemente baseados em massa (toneladas ou quilogramas). Para viabilizar a análise, foram adotadas as seguintes densidades para a conversão de volume para massa: 15 kN/m³ para o agregado (rachão e brita) e 16 kN/m³ para a areia. Os demais materiais, como geossintéticos, aço e concreto, já possuíam fatores de emissão em unidades compatíveis com seus quantitativos de projeto (por m², kg ou m³). O quantitativo de projeto para forma de madeira foi fornecido em área (m²). Para possibilitar o uso da base de dados ICE, expresso em kg para esse material, estimou-se uma espessura de 2 cm e um peso específico de 5 kN/m³ para as placas de madeira. O geotêxtil tecido de polipropileno utilizado no projeto não possui EPD. Assim, considerou-se a EPD de um geotêxtil tecido de poliéster como uma aproximação representativa e válida para a estimar o impacto ambiental do geotêxtil empregado na obra, fazendo-se o ajuste em função das gramaturas dos materiais.

A soma das emissões parciais de todos os componentes de cada sistema resultou no valor total de ECO2 de cada alternativa, permitindo uma comparação direta do impacto ambiental, conforme apresentado nas Tabelas 2 e 3.



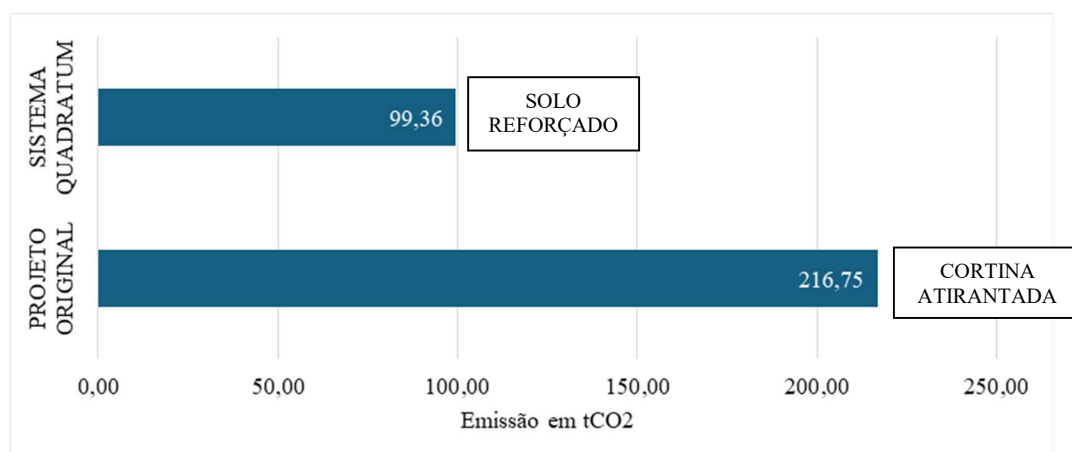
Tabela 2. Quantitativo referente ao projeto executado utilizando sistema de solo reforçado.

Item	Quantidade
Conjunto tela metálica para face 2,5 x 0,6 m [un]	1.245
Geotêxtil tecido polipropileno 50/50 [m ²]	4.290
Geogrelha PVA T=35 kN/m, $\epsilon=5\%$ [m ²]	8.860
Geogrelha PVA T=55 kN/m, $\epsilon=5\%$ [m ²]	6.670
Geogrelha PVA T=80 kN/m, $\epsilon=5\%$ [m ²]	5.715
Geogrelha PVA T=110 kN/m, $\epsilon=5\%$ [m ²]	3.810
Geogrelha PVA T=150 kN/m, $\epsilon=5\%$ [m ²]	2.385
Geogrelha PVA T=200 kN/m, $\epsilon=5\%$ [m ²]	1.430
Areia para camada drenante [m ³]	765
Rachão Ø<25cm para a face do muro [m ³]	1.240
Brita 1 para regularização das camadas no apoio das telas [m ³]	75

Tabela 3. Quantitativo referente ao projeto original em cortina atirantada.

Item	Quantidade
Concreto [m ³]	540,50
Aço [kg]	83.900
Forma de Madeira [m ²]	1.516,60

A Figura 6 ilustra a pegada de CO₂ total, em toneladas, para o sistema de solo reforçado com geogrelhas e para a solução convencional em cortina atirantada do projeto original. A diferença nas emissões entre os dois sistemas se deve, principalmente, à composição dos materiais de cada um. A principal razão para o carbono incorporado menor no solo reforçado é a eliminação do concreto. O consumo de aço e, em particular, o processo de galvanização, também são fatores com uma parcela relevante nas emissões totais, assim como a fabricação dos reforços geossintéticos. Contudo, o impacto ambiental gerado pelo grande volume de concreto na alternativa de cortina atirantada supera consideravelmente o dos demais materiais.

Figura 6. Pegada CO₂ das soluções de muros de contenção (tCO₂).

A comparação direta entre os dois sistemas demonstra que a escolha pela solução com solo reforçado proporcionou uma redução de 117,39 toneladas de CO₂eq, o que representa uma diminuição de aproximadamente 55% na pegada de carbono da estrutura. Este resultado quantifica o benefício ambiental substancial da troca da tecnologia construtiva, evidenciando que a alternativa com geossintéticos se mostrou significativamente mais sustentável.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A substituição do projeto de uma cortina atirantada com fundação em estacas e tirantes com comprimento livre de até 40 m por uma contenção em solo reforçado com geogrelhas teve como objetivo principal diminuir o prazo de execução e o custo da obra. Além dos benefícios econômicos e de aceleração do cronograma de execução da obra, essa alteração de projeto promoveu uma significativa redução da emissão de Gases de Efeito Estufa (GGEs) relacionada aos ciclos de vida dos materiais empregados em cada alternativa. O cálculo do carbono incorporado CO₂eq para as duas opções de projeto demonstrou que a escolha pela solução com solo reforçado proporcionou uma redução de 117,39 toneladas de CO₂eq, o que representa uma diminuição de aproximadamente 55% na pegada de carbono da estrutura, para uma contenção com área de face de 1.858 m². Este resultado quantifica o benefício ambiental substancial da troca da tecnologia construtiva, evidenciando que a alternativa com geossintéticos se mostrou significativamente mais sustentável.

AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos ao Grupo Monto pelo fornecimentos dos projetos executivos considerados e ao futuro engenheiro Guilherme Apolinário Marcondes pelo apoio nos cálculos de carbono incorporado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 16920-1: *Muros e taludes em solos reforçados Parte 1: Solos reforçados em aterros*. Rio de Janeiro.
- Bizjak, K. F.; Lenart (2018), S. *Life cycle assessment of a geosynthetic-reinforced soil bridge system— A case study*. Geotextiles and Geomembranes, 46(5), 543-558.
- Fraser, I. et al. (2012) *Comparative life cycle assessment of geosynthetics versus conventional construction materials, a study on behalf of the EAGM, Case 4, Soil retaining wall*. In: Proceedings of the 5th European Geosynthetics Congress, Valencia, Spain. España: International Geosynthetics Society. p. 218-222.
- Gerscovich, D., Danzinger, B. R., Saramago, R. (2016) *Contenções: teoria e aplicações em obras*. Oficina de textos, São Paulo.
- Huesker Synthetic GmbH (2021). *Environmental Product Declaration as per ISO 14025 and EN 15804 +A1. Fortrac MDT*. Kiwa BCS Öko-Garantie GmbH - Ecobility Experts. Fortrac MDT
- Huesker Synthetic GmbH (2021). *Environmental Product Declaration as per ISO 14025 and EN 15804 +A1. Stablenka*. Kiwa BCS Öko-Garantie GmbH - Ecobility Experts. Fortrac T.
- ICE Database (2024). *University of Bath & Carbon Trust, Inventory of Carbon & Energy (ICE)*. Document undertaken by the University of Bath's Department of Engineering, with support from the Carbon Trust and EPSRC.
- Passuello, A. C. B.; Oliveira, A. F.; Costa, E. B.; Kirchheim, A. P. (2014) *Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida na análise de impactos ambientais de materiais de construção inovadores: estudo de caso da pegada de carbono de clínqueres alternativos*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 7-20. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.
- Silva, V. G.; Silva, M. G. (2000) *Análise do ciclo de vida aplicada ao setor de construção civil: revisão da abordagem e estado atual*. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Anais. ENTAC, 51-59.
- United Nations Environment Programme (2022) *Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. Nairobi.
- WRI, WBCSD (2004). *GHG Protocol corporate accounting and reporting standard*. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. Revised Edition.