

ECOEFIÊNCIA EM GEOTECNIA: AVALIAÇÃO DA PEGADA DE CARBONO EM ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO

Gomes HC ¹; Cota SG ²; Urashima DC ³; Ferreira LD⁴; Souza ST⁵.

Resumo – O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar o impacto ambiental, especificamente a pegada de carbono, de diferentes tipos de estruturas de contenção, com o intuito de contribuir para o desenvolvimento sustentável na engenharia civil. A motivação para esta pesquisa reside na necessidade premente de reduzir as emissões de dióxido de carbono na indústria da construção civil, alinhada aos novos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável preconizados na Agenda 2030 das Organizações das Nações Unidas. Foram estudadas três categorias de estruturas: concreto armado, solo reforçado com geogrelhas e muros de gabião. O método utilizado incluiu o dimensionamento das estruturas conforme critérios de estabilidade geotécnica, bem como a análise dos teores de carbono associados a cada material. Os resultados indicaram que as estruturas de solo reforçado e muros de gabião apresentaram emissões de carbono inferiores em comparação com o concreto armado. Enquanto, o concreto armado registrou emissões entre 80.547,5 e 113.877,5 toneladas de dióxido de carbono, os muros de gabião e solo reforçado emitiram 1.799,6 e 72,8 toneladas, respectivamente. A análise comparativa ressaltou o potencial de ganho sustentável das alternativas mais ecoeficientes, de forma a destacar a importância da adoção de práticas sustentáveis na engenharia civil. Alternativas mais sustentáveis podem contribuir significativamente para a redução das emissões de carbono. Neste contexto, ressalta-se o papel das geociências na promoção de soluções mais ecoeficientes e na busca por um desenvolvimento sustentável.

Abstract – This study aimed to evaluate the environmental impact, specifically the carbon footprint, of different types of containment structures, with the objective of contributing to sustainable development in civil engineering. The motivation for this research stems from the urgent need to reduce carbon dioxide emissions in the construction industry, in line with the new Sustainable Development Goals outlined in the United Nations' 2030 Agenda. Three categories of structures were studied: reinforced concrete, soil reinforced with geogrids, and gabion walls. The methodology included the design of the structures based on geotechnical stability criteria, as well as the analysis of the carbon content associated with each material. The results indicated that reinforced soil structures and gabion walls had lower carbon emissions compared to reinforced concrete. While reinforced concrete would record emissions between 80,547.5 and 113,877.5 tons of carbon dioxide, gabion walls and reinforced soil would emit 1,799.6 tons and 72.8 tons, respectively. The comparative analysis highlighted the sustainable potential of more eco-efficient alternatives, emphasizing the importance of adopting sustainable practices in civil engineering. More sustainable alternatives can significantly contribute to reducing carbon emissions. In this context, the role of geoscience in promoting more eco-efficient solutions and pursuing sustainable development is underscored. **Keywords:** Sustainable development, earth retaining structures, eco-efficiency in geotechnics, carbon footprint.

Palavras-Chave – Desenvolvimento sustentável, estruturas de contenção, ecoeficiência em geotecnia, pegada de carbono

¹ PhD student in Civil Engineering. School of Engineering, Computing and Mathematics | Faculty of Science and Engineering | University of Plymouth. henrique.combagomes@plymouth.ac.uk

² PhD estudante do Departamento de Engenharia de Minas – DEMIN/UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais.

³ Prof.^a Dr^a. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – PPGE/CEFET-MG; Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. (35) 36904229, urashima@cefetmg.br

⁴ Prof. Dr. Departamento de Engenharia Urbana, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas – NUGEO/UFOP; Universidade Federal de Ouro Preto. (31) 3559-1160, lucas@ufop.edu.br

⁵ Aluna de Graduação em Engenharia Civil – UFOP; Universidade Federal de Ouro Preto. sabrinatoledo99@yahoo.com.br

1. INTRODUÇÃO

Em 2015 foi publicada pela Organização das Nações Unidas (ONU) a Agenda 2030, que preconiza dezessete novos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), os quais são indissociáveis. Entretanto, com ênfase no ODS de número treze, que trata de ações contra mudança global do clima e que propõe medidas relevantes para mitigar mudanças climáticas, de forma a evitar problemas associados com o aquecimento global [1], tais como aumento médio da temperatura, derretimento de calotas polares e extinção de fauna e flora, entre outros impactos negativos [2,3], uma das aplicações das geociências para a sociedade e geoética estaria atrelada às modificações no contexto de engenharia associadas ao ODS treze seria uma forma para limitar as emissões de carbono.

A indústria da engenharia civil é um setor essencial para ajuste do espaço urbano e desenvolvimento, sendo o concreto o segundo produto mais consumido em todo o mundo [4]. Entretanto, essa indústria é uma das principais emissoras de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, na qual a indústria cimenteira corresponde a 5% das emissões globais de CO₂ [5]. Para tal, de forma a visar o cumprimento do ODS 13 preconizado da Agenda 2030, novos materiais têm sido investigados para substituir o Cimento Portland e o concreto nas atividades da construção civil.

Diferentes tipologias construtivas têm sido estudadas como alternativas que contribuem no processo de tornar a engenharia mais resiliente. Dois exemplos seriam a aplicação de materiais geossintéticos, materiais que colaboram com todos os dezessete ODS [6], e a aplicação de muros de gabiões em estruturas de contenção devido aos menores impactos ambientais relacionados a diversos fatores como potencial de aquecimento global e toxicidade humana, eutrofização, esgotamento de combustíveis fósseis e acidificação [7].

Além disso, a aplicação dos muros de gabiões e geossintéticos colabora com a diminuição do aquecimento global. Ambas as tecnologias apresentam menores teores de CO₂ emitidos para a atmosfera devido à menor pegada de carbono associada ao gerenciamento da sua cadeia produtiva e manutenção quando comparado à de materiais cimentícios [5,8]. Nesse sentido, a substituição de estruturas de concreto por opções mais sustentáveis já tem sido observada em diferentes áreas [9], mas principalmente em obras de cunho geotécnico, como estruturas de contenções de maciços de solo [8,10].

Desta forma o artigo tem como objetivo principal avaliar a pegada de carbono de uma estrutura de contenção calculada em concreto armado e compará-la às alternativas concebidas com geossintéticos e muro por gabião.

2. METODOLOGIA

Foram dimensionados muros de contenção em três tipologias construtivas, concreto armado, gabião e solo reforçado com geossintético, para estudar o impacto relativo às emissões de carbono de cada uma das estruturas. Em um primeiro momento foi simulada a situação de um maciço de solo sem reforço e exposto a uma sobrecarga adicional distribuída de 40 kPa. O solo em questão é uma argila arenosa com ângulo de atrito (ϕ) 18°, intercepto coesivo (c) 35 kPa e peso específico natural (γ_{solo}) 18 kN/m³. A avaliação da estabilidade do maciço foi realizada conforme o método de Bishop considerando a ruptura em cunha.

Após verificação da estabilidade, as estruturas de contenção foram calculadas. O muro de contenção de concreto armado foi dimensionado conforme os critérios de Rankine e Coulomb, de forma a considerar um concreto estrutural com peso específico (γ_{concreto}) de 24 kN/m³. Para a concepção do solo reforçado e da contenção por muro de gabião foi utilizado o software MacStars W 4.0 da empresa Maccaferri [11]. A estrutura foi calculada para uma situação de corte de 20 metros de altura. As modelagens foram realizadas para um solo sem presença de nível freático, ou seja, com poropressão nula. A Figura 1 representa a situação avaliada na modelagem.

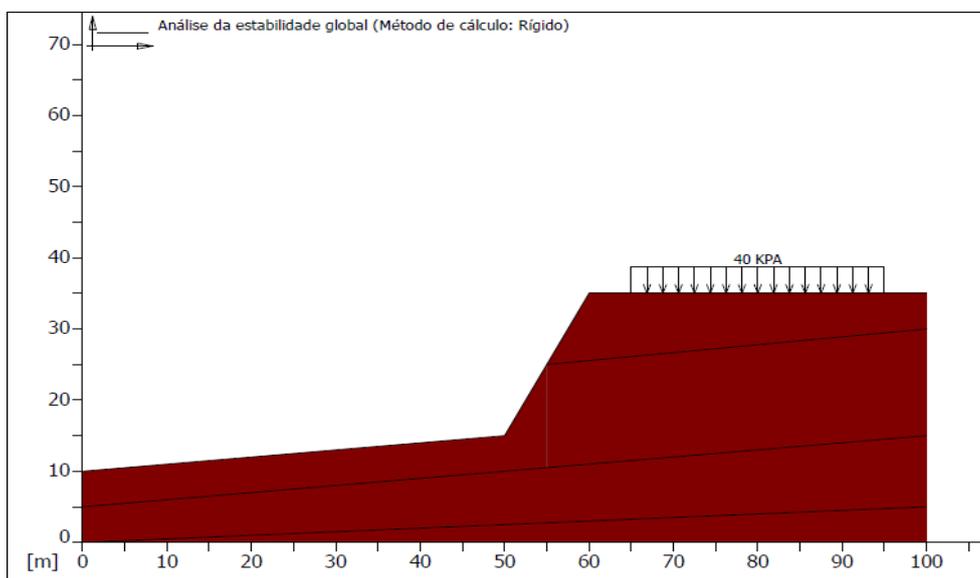


Figura 1. Terreno considerado na análise. Fonte: Autores

Para avaliar o potencial de ganho sustentável, o volume de dióxido de carbono emitido associado às contenções foi calculado. Para tal, os teores de CO₂ associados a cadeia construtiva dos materiais, desde sua criação até a aplicação, foram obtidos através de dados da literatura. Em seguida, os teores foram multiplicados pelas dimensões dos muros de contenção modelados obtendo-se o teor de CO₂ por metro quadrado de muro para cada uma das três situações.

3. RESULTADOS

3.1. Modelagem da situação sem reforço

A análise global foi calculada pelo método de Bishop considerando uma estrutura rígida, com o cálculo das prováveis cunhas de cisalhamento do talude. O resultado da análise está identificado na Figura 2.

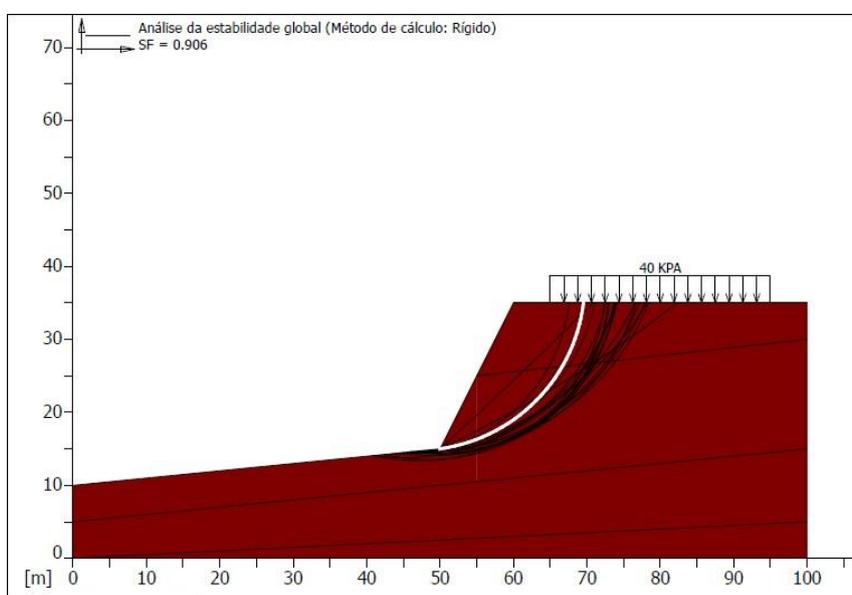


Figura 2. Análise da estabilidade global. Fonte: Autores

Conforme ilustrado na Figura 2, a análise da estabilidade global identificou um Fator de Segurança (FS) inferior a 1,00 (0,906), o que permite identificar a instabilidade da estrutura e a necessidade da instalação de reforço para assegurar a estabilidade.

3.2. Modelagem do muro de contenção de concreto

A primeira situação de reforço considerou o dimensionamento de um muro de contenção de concreto armado. Para tal, foi estimado um corte do maciço e construção da estrutura de contenção, conforme ilustrado na Figura 3.

O dimensionamento do muro de arrimo foi baseado nos métodos de Rankine e Coulomb, com os critérios de segurança mínimo para tombamento e deslizamento superior à 1,5. Com o método de Rankine, atingiu-se os valores de 6,475 para o $FS_{\text{tombamento}}$ e 1,525 para $FS_{\text{deslizamento}}$, respectivamente. Por sua vez, os critérios de segurança conforme Coulomb atingiram os valores de 6,608 para $FS_{\text{tombamento}}$ e 1,554 para o $FS_{\text{deslizamento}}$, respectivamente. Ao final, o muro de arrimo foi dimensionado conforme a Figura 4a, com suas dimensões dispostas conforme na Figura 4b.

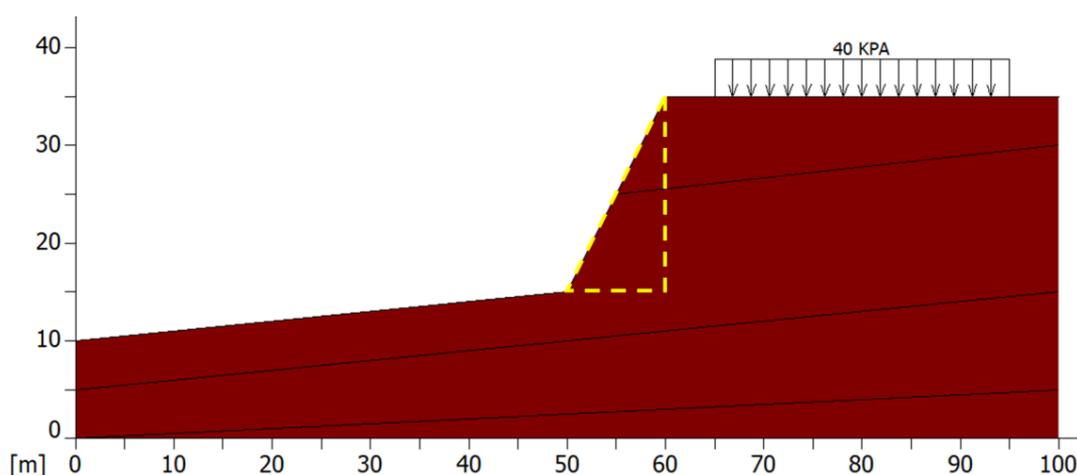


Figura 3. Região de corte. Fonte: Autores

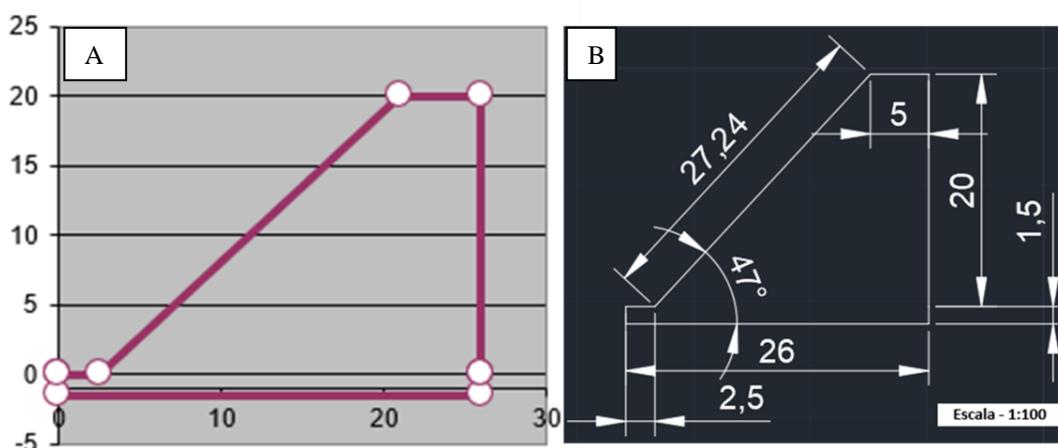


Figura 4(a). Dimensionamento do muro de contenção no Microsoft Excel

Figura 4(b). Representação das dimensões AutoCAD 2014.

Fonte: Autores

A partir das dimensões identificadas e ao considerar a profundidade de 1 metro, o volume de concreto necessário para a estrutura de contenção foi de 277,75m³.

3.3. Modelagem da estrutura de contenção em solo reforçado

Foram escolhidas geogrelhas com resistência longitudinal de 300 kN/m com comprimento de reforço de 26 metros, espaçamento de 1 metro e comprimento de ancoragem de 5 metro. Em relação ao muro, foi considerada a profundidade de 1 metro, base (W) de 26 metros e altura (H) de 20 metros, totalizando 520m³ de muro. Para o aterro realizado para compor o solo reforçado foi empregado areia média para reforçar a estrutura, com coesão de 5 kPa, ϕ de 28° e γ de 18 kN/m³. A disposição do solo reforçado está expressa na Figura 5.

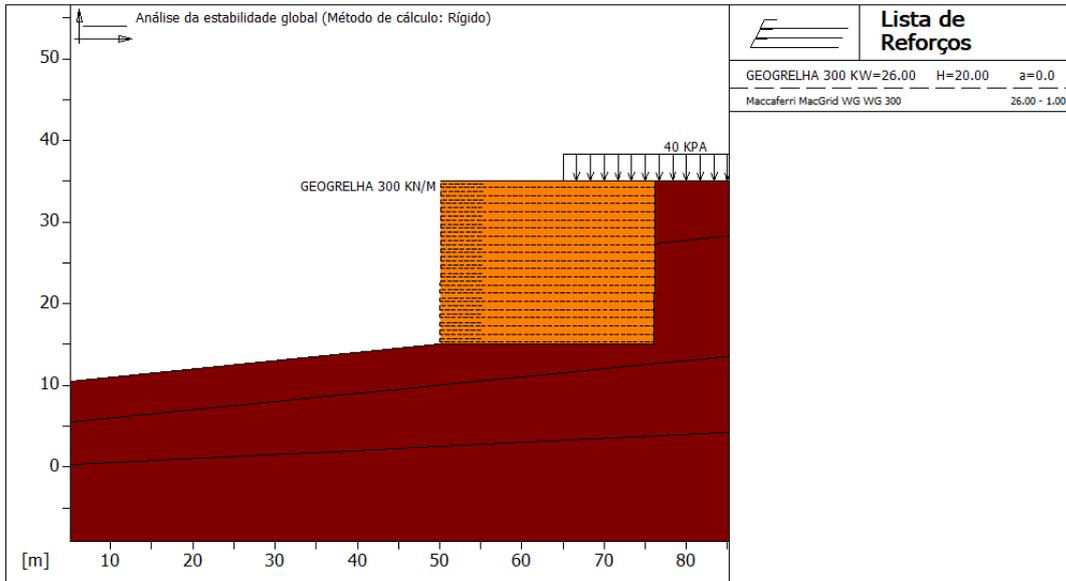


Figura 5. Estrutura de solo reforçado. Fonte: Autores

A análise de estabilidade global conforme Bishop atingiu o FS de 1,518 que comprova a estabilidade conforme a ABNT NBR 16920-1 [14] como é superior a 1,0, indica que a estrutura foi estabilizada. A Figura 6 demonstra o resultado.

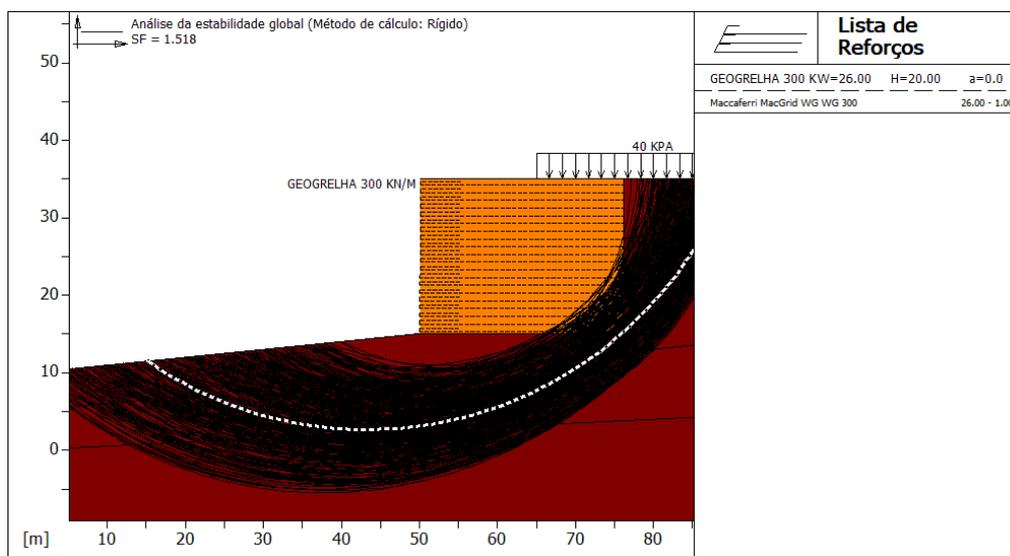


Figura 6. Análise da estabilidade global da estrutura de solo reforçado. Fonte: Autores

3.4. Modelagem da estrutura de contenção com gabião

O sistema de contenção por muro de gabião utilizou sistema de malha 6x8 centímetros e diâmetro do fio de 2,7 centímetros. As malhas foram preenchidas com rochas de coesão 10 kPa,

ϕ de 40° e γ de 26 kN/m^3 . O muro foi montado com dimensão de 11 metros de base e 20 metros de altura, totalizando 220m^2 de muro, com espaçamento entre gaiolas de 1 metro. A Figura 7 ilustra a estrutura modelada no software.

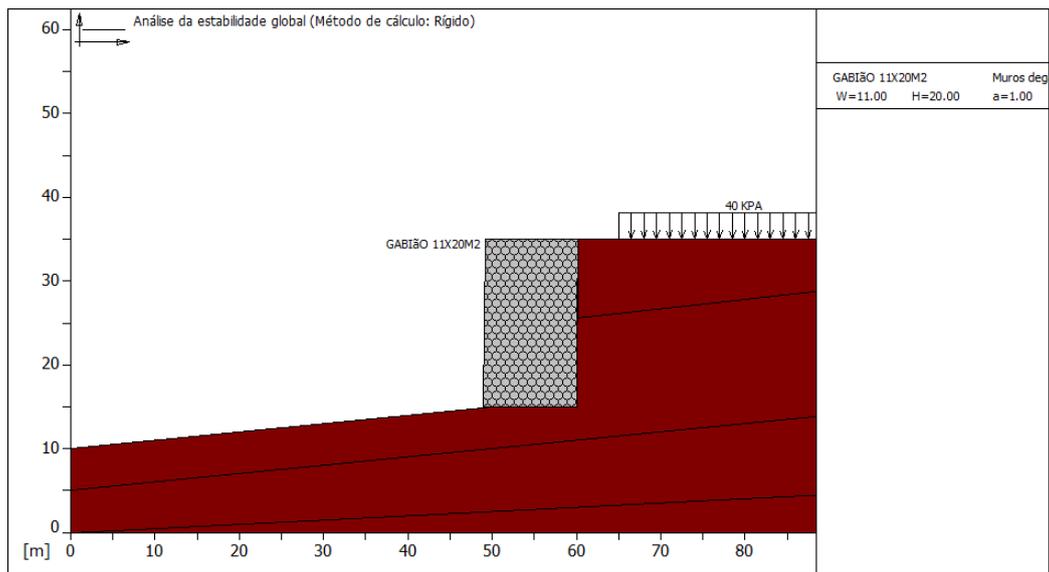


Figura 7. Estrutura de muro de gabião. Fonte: Autores

A análise de estabilidade global conforme Bishop atingiu o FS de 1,013, indicando estabilidade. A Figura 8 ilustra o resultado.

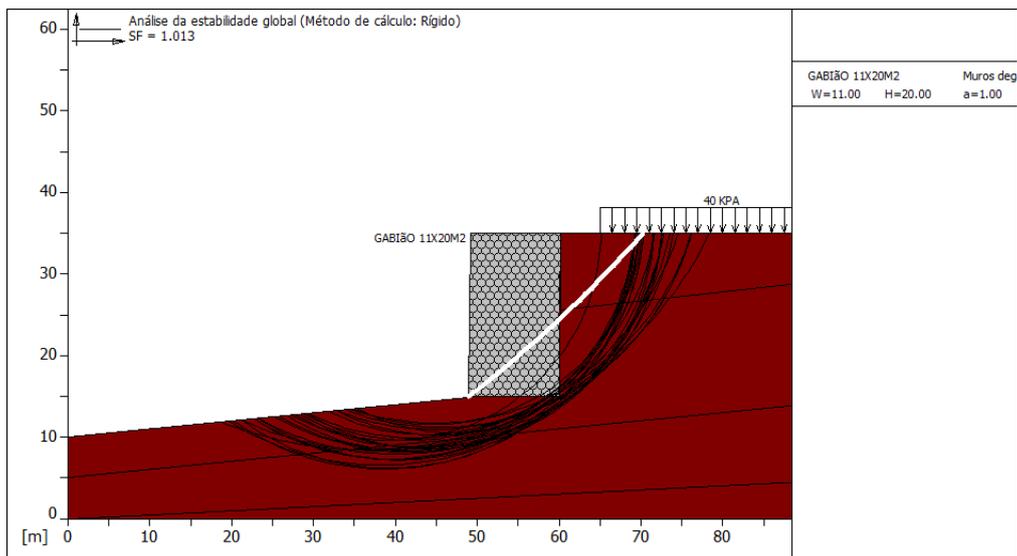


Figura 8. Análise da estabilidade global da estrutura do muro de gabião. Fonte: Autores

3.5. Comparativo de carbono emitido relacionado a cada uma das tipologias construtivas

Para cálculo da pegada de carbono associada a cada uma das estruturas de contenção foram consultados valores presentes na literatura. A literatura relata que a pegada de carbono do concreto varia entre $290 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$ até $410 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$ por tonelada, que varia conforme os teores de cimento presente no material [12]. Por sua vez, muros de contenção de solo reforçado com geogrelhas apresentam valores entre 2,36 tonelada de CO_2 por tonelada de geogrelha ($\text{tCO}_2\text{e/t}$) a $2,97 \text{ tCO}_2\text{e/t}$ ou $0,14$ toneladas de CO_2 por metro quadrado de geogrelha ($\text{tCO}_2\text{e/m}^2$) [8,13]; e muros de gabião apresentam valor de $8,18 \text{ tCO}_2\text{e/m}^2$ [8], respectivamente. Ao considerar esses

valores, o teor de carbono emitido em cada uma das tipologias de contenção foi representado na Tabela 1.

Tabela 1 - Teores de emissão de carbono das diferentes estruturas de contenção

Tipo de muro	Quantidade de material m ³	Tonelada de CO ₂ (tCO ₂ /m ³)	Emissão de CO ₂ da estrutura (tCO ₂)
			80.547,5 –
Concreto	277,75	290 - 410	113.877,5
Solo reforçado	520	0,14	72,8
Gabião	220	8,18	1.799,6

Fonte: Autores

Conforme identificado na Tabela 1, a estrutura com o menor teor de carbono emitido foi a de solos reforçados, 72,8 tCO₂, seguida do muro de gabião, 1.799,6 tCO₂, e pelo muro de concreto armado, cujos valores variavam entre 80.547,5 tCO₂ a 113.877,5 tCO₂, respectivamente. A partir desses resultados, torna-se evidente o potencial de ganho ambiental associado a geociências da aplicação de estruturas alternativas de contenção produzidas com materiais que substituem o cimento Portland, como é o caso dos geossintéticos, especificamente das geogrelhas em estruturas de solo reforçado, e muros de gabiões.

4. CONCLUSÕES

A fim de estudar a contribuição das geociências para a sociedade e geoética, torna-se evidente a necessidade de avaliar o uso de cimento e concreto como materiais aplicados às obras de engenharia civil e de cunho geotécnico. A partir da modelagem computacional de três estruturas de contenção distintas, produzidas com diferentes tipos de materiais, foi possível notar o possível ganho sustentável referente às emissões de CO₂.

Foram avaliados três tipos de muro de contenção, concreto armado, solo reforçado com geogrelha e gabiões. Em todos os casos, as estruturas atingiram os requisitos mínimos esperados de projeto, com Fator de Segurança superior a 1,0, o que comprova a estabilidade global das estruturas.

Ao considerar o parâmetro sustentabilidade relacionado a geociências para a sociedade e geoética, o teor de CO₂ calculado para construção de cada uma das estruturas demonstrou que o muro de concreto emitiria teores de carbono entre 80.547,5 toneladas até 113.877,5 toneladas, o muro de gabião 1.799,6 toneladas e o muro de solo reforçado com geogrelha 72,8 toneladas. Esses resultados demonstram o potencial de ganho sustentável associado a aplicação de materiais como alternativa aos compósitos cimentícios, que podem contribuir na tomada de decisões das geociências aplicadas a sociedade e, conseqüentemente, para o desenvolvimento sustentável.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) pelo fomento à pesquisa e às bolsas de pesquisa, e disponibilização de infraestrutura para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] BRASIL, Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável, (2022).
- [2] S.K. Kaliyavaradhan, T. Ling, K. Hung, CO₂ sequestration of fresh concrete slurry waste: Optimization of CO₂ uptake and feasible use as a potential cement binder, *J. CO₂ Util.* 42 (2020) 101330. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101330>.
- [3] H.C. Gomes, E.D. Reis, R.C. De Azevedo, C. de S. Rodrigues, F.S.J. Poggiali, Carbonation of Aggregates from Construction and Demolition Waste Applied to Concrete: A Review, *Buildings.* 13 (2023) 1097. <https://doi.org/10.3390/buildings13041097>.
- [4] A.Y. Nayana, S. Kavitha, Evaluation of CO₂ emissions for green concrete with high volume slag, recycled aggregate, recycled water to build eco environment, *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 8 (2017) 703–708.
- [5] A. Hasanbeigi, L. Price, E. Lin, Emerging energy-efficiency and CO₂ emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (2012) 6220–6238. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.019>.
- [6] N. Touze, Healing the world: a geosynthetics solution, *Geosynth. Int.* 28 (2021) 1–31.
- [7] A.T. Balasbaneh, D. Yeoh, M.I. Juki, M.H.W. Ibrahim, A.R.Z. Abidin, Assessing the life cycle study of alternative earth-retaining walls from an environmental and economic viewpoint, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28 (2021) 37387–37399. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13190-4>.
- [8] G. Report, Sustainable geosystems in civil engineering applications, *Civ. Eng.* (2010) 2008–2009. www.wrap.org.uk.
- [9] M. Geisielly, A. Guimarães, D.D.C. Urashima, Holistic engineering with geosynthetics in the pursuit of sustainable development: The 2030 Agenda and indicators of sustainable cities and communities, 19 (2023) 143–158.
- [10] I. Fraser, M. Stucki, S. Büsler, R. Itten, R. Frischknecht, Comparative Life Cycle Assessment Of GeosyntheticS Versus Conventional Construction Materials, A Study on behalf of the E.A.G.M., Case 4, Retaining Wall, 5th Eur. Geosynth. Congr. 5 (2012) 1–5.
- [11] Maccaferri, Macstars W 4.0, (2024).
- [12] M. Taqui, S.A. Uzair, A. ul Hasson, Utilization of Different Industrial Wastes in Concrete as a Cement Replacement Material and Its Effects on Strength, *Int. J. Sci. Res. Knowl.* 4 (2016) 20–27. <https://doi.org/10.12983/ijrsk-2016-p0020-0027>.
- [13] P. Assinder, N. Dixon, G. Fowmes, J. Raja, M. Frost, Obtaining reliable embodied carbon values for geosynthetics, *Geosynth. Int.* (2015) 1–9. <https://doi.org/10.1680/gein.15.00020>.
- [14] ABNT, NBR 16920-1 Muros e taludes em solos reforçados parte 1: Solos reforçados em aterros, (2021).