

Critérios de Dimensionamento para Muros de Solo Reforçado com Faceamento em Geocélulas

Állisson Marllon Cássio Alves Barbosa

Engenheiro Civil, UNICAMP, Campinas-SP, Brasil, allissonmarllon@gmail.com

Wladimir Caressato Júnior

Engenheiro Civil, UNICAMP, Campinas-SP, Brasil, wladimircressato@hotmail.com

Bruna Todescan de Carvalho

Engenheira Civil, PUC Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, Brasil, brutodescan@hotmail.com

RESUMO: A construção de contenções, através da utilização de muros de solo reforçado é uma prática consolidada, que vem sendo utilizada desde a década de 80 no mercado internacional. No mercado brasileiro, ainda é uma prática, relativamente nova, e que vem ganhando força nos últimos anos devido aos inúmeros trabalhos realizados na área. O constante avanço da tecnologia vem nos brindando cada vez mais com novas materiais e técnicas construtivas, visando cada vez mais o aumento dos níveis de segurança das estruturas, principalmente devido as constantes mudanças climáticas que temos enfrentado. Visando a construção de estruturas sustentáveis, reduzindo a utilização de materiais de empréstimo, a utilização das geocélulas preenchidas com solo, como estruturas para o paramento frontal para tais estruturas, nos mostra grandes benefícios, tanto técnicos quanto econômicos, em comparação as técnicas convencionais, as quais podemos citar a rapidez na execução, a tolerância a recalques diferenciais, a possibilidade da utilização do solo local, reduções no impacto ambiental, direta e indiretamente, entre outros. Partindo destes princípios, serão abordados os critérios de cálculo a serem considerados no dimensionamento destes tipos de estrutura, como o aumento da pseudo-coesão do material confinado, e conseqüentemente da resistência ao corte do faceamento, tendo-se em exemplos práticos, a comprovação com projetos realizados e executados em toda a América Latina. Somado a isto, serão abordados alguns aspectos comparativos a outras soluções de contenções tradicionais no mercado brasileiro, e o quão inovador e benéfico pode ser a adoção de contenções com geossintéticos.

PALAVRAS-CHAVE: Muros de Solo Reforçado, Geocélulas PEAD, Geossintéticos, Estruturas de Contenção, Comparativo de Custos.

ABSTRACT: The construction of retaining structures, using reinforced soil walls, is a well-established practice that has been employed since the 1980s in the international market. In the Brazilian market, it is still a relatively new practice that has been gaining momentum in recent years due to numerous works carried out in the area. The constant advancement of technology has been increasingly providing us with new materials and construction techniques, aiming to enhance the safety levels of structures, primarily due to the constant climate changes we have been facing. In pursuit of sustainable construction, reducing the use of borrowed materials, the use of geocells filled with soil as structures for the frontal facing of such structures shows significant benefits, both technically and economically, compared to conventional techniques. These benefits include faster execution, tolerance to differential settlements, the possibility of using local soil, reductions in environmental impact, both directly and indirectly, among others. Based on these principles, the calculation criteria to be considered in the design of these types of structures will be addressed, such as the increase in the pseudo-cohesion of the confined material, and consequently the resistance to the cutting of the facing, with practical examples demonstrating validation through projects carried out and executed throughout Latin America. Additionally, some comparative aspects will be addressed in relation to other traditional containment solutions in the Brazilian market, and how innovative and beneficial the adoption of geosynthetic containment can be.

KEYWORDS: Reinforced Soil Walls, HDPE Geocells, Geosynthetics, Retaining walls, Cost Comparison.

1 INTRODUÇÃO

A construção de estruturas de contenção desafia engenheiros e projetistas há décadas, especialmente em regiões com topografias acidentadas ou suscetíveis a deslizamentos de terra. A técnica de muros de solo reforçado tem sido uma solução consolidada internacionalmente desde a década de 80, demonstrando sua eficácia na estabilização de encostas e contenção de taludes. No contexto brasileiro, embora mais recente, essa prática tem emergido como uma resposta promissora às demandas de infraestrutura e desenvolvimento urbano, impulsionada pela busca contínua por soluções eficientes e sustentáveis na engenharia civil.

O crescente avanço tecnológico tem desempenhado um papel crucial na evolução das técnicas construtivas, impulsionando a introdução de materiais e métodos inovadores. Nesse sentido, as geocélulas preenchidas com solo surgem como uma alternativa versátil e eficiente para o faceamento de muros de contenção. Essa abordagem não apenas oferece benefícios técnicos substanciais, como também promove ganhos econômicos e ambientais significativos em comparação com as técnicas convencionais.

Ao considerar a importância crescente da sustentabilidade ambiental e da eficiência construtiva, torna-se evidente a necessidade de explorar a fundo os critérios de projeto e as aplicações práticas dos muros de contenção com faceamento em geocélulas. Este artigo se propõe a investigar os principais aspectos relacionados aos critérios de dimensionamento e à implementação dessas estruturas inovadoras, levando em conta não apenas os fundamentos teóricos, mas também a validação por meio de exemplos concretos de projetos executados em toda a América Latina, visando contribuir para o avanço do conhecimento técnico-científico no campo da engenharia geotécnica. Ao longo deste trabalho, serão discutidos os principais desafios e oportunidades associados à adoção de muros de contenção com faceamento em geocélulas, explorando suas vantagens, limitações e considerações práticas para uma implementação bem-sucedida, e comparando com algumas das soluções convencionais mais utilizadas atualmente.

2 GEOCÉLULAS

A “malha de areia” ou “*Sand grid*”, como foram intituladas em sua concepção, foram desenvolvidas pelo Corpo de Engenheiros dos EUA (USCOE) a partir dos protótipos que Steve Webster desenvolveu na década de 1970, para acesso em praias com fins militares. Este experimento culminou num documento denominado GL-86-19, e em seu Apêndice A (1986), descreve a colmeia de abelha como uma célula de PEAD com abertura de 200mm x 200mm e altura de 200mm, lisa e sem perfurações que serviam apenas para confinar areia, por um curto período. No final da década de 80 este geossintético passou a ser produzido e utilizado no setor privado (obras civis), tendo assim seu nome modificado para “Geocélula” ou “Geocell”.

Para uso Civil, já no início dos anos 90, Robert Koerner apresenta uma primeira aproximação do efeito do confinamento, que relaciona o diâmetro médio (D) com a altura da geocélula (H) e o atrito do material de preenchimento com as paredes da geocélula (δ) para estimar a resistência à extração do material confinado, a qual é expressa na Equação 1.

$$\sigma_c = 2\left(\frac{H}{D}\right)\sigma_h \tan \delta \quad (1)$$

Esta primeira expressão permite-nos compreender que o protótipo do Corpo de Engenheiros apresentava lacunas, devido a abertura e características da parede da estrutura considerada, acarretando assim em um desempenho inferior, ao real efeito de confinamento proporcionado pela estrutura. Por este motivo, inicia-se a produção das Geocélulas como agora as conhecemos, fabricadas a base de polietileno de alta densidade (PEAD), com geometria (aberturas e alturas) variáveis e com padrão de perfuração e textura em suas paredes, garantindo assim uma melhor interação com o material de preenchimento.

2.1. Características Relevantes das Geocélulas

Com as contribuições de Koerner (2005) e o surgimento Instituto Geossintético (GeoSynthetic Institute) nos EUA, elaborou-se a especificação GRI-GS-15 para as Geocélulas de PEAD, a qual apresenta recomendações de propriedades, ensaios e suas respectivas frequências, que auxiliam profissionais da engenharia na especificação da solução. O padrão GS-15 se difere da proposta pelo do Corpo de Engenheiros dos EUA, pois inclui conceitos de comportamento mecânico, interação por ensaios de cisalhamento, durabilidade e vida útil, orientados aos níveis de durabilidade tipicamente exigidos em projetos de engenharia.

Para aplicações em estruturas de contenção, como é o caso do presente estudo, se faz importante utilizar geocélula que proporcione interação com o aterro. Tal característica é abordada na especificação GS-15, através do ensaio de corte conforme ASTM D5321, o qual utiliza uma areia bem graduada (SW) como padrão inicial. Portanto, para atingir propriedades informadas pelo GRI-GS15, a solução deve ser perfurada e texturizada para obter um melhor atrito com o material de preenchimento.

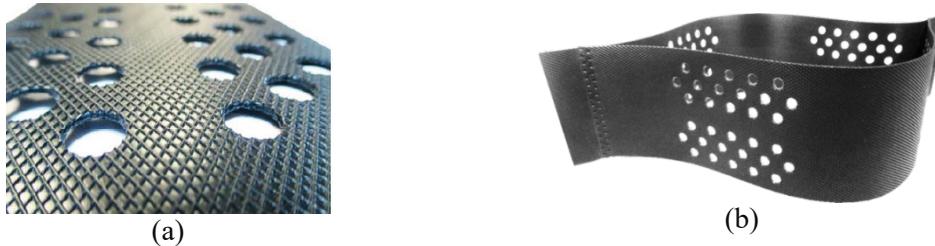


Figura 1. (a) Detalhe de textura e perfuração (b) Estrutura de confinamento da geocélula.

Também são relevantes curvas de tensão-deformação, para conhecer os níveis de contribuição mecânica no projeto e para questões de durabilidade, testes de Oxidação (OIT) e Resistência UV, para determinar o comportamento ao longo do tempo da geocélula, sendo ambos abordados pelo GRI-GS15.

Adicionalmente, a ASTM D8269 “Standard Guide for the Use of Geocells in Geotechnical and Roadway Projects”, considera o demonstrado pelo GRI-GS15 como método preferível para MQA e MQC para geocélulas de PEAD.

2.2. Estimativa do efeito de melhoria no esforço de corte de solo com Geocélulas

As expressões elaboradas por Koerner (2005) foram uma primeira aproximação do efeito de confinamento de solos com a aplicação das geocélulas. No entanto, o fenômeno começou a ser estudado e aprofundado por vários pesquisadores, como é o caso de Bathurst e Karpurapu (1993), onde realizaram ensaios triaxiais em materiais arenosos e pedregosos (sem coesão), para estimar como poderia ser quantificado o efeito de confinamento das geocélulas. Com base na teoria da membrana, determinaram que um solo sem geocélula suportava uma carga vertical, e quando a geocélula era incluída, o suporte aumentava devido à contribuição mecânica indireta das paredes das células. Isso foi registrado em diversos testes com diferentes graduações, onde concluiu-se que, embora o material seja puramente granular, o aumento da carga vertical foi obtido através do surgimento de uma pseudo-coesão (C_r), devido ao efeito da restrição gerada pela geocélula. Tal efeito pode ser observado nas seguintes equações:

$$\sigma_c = \frac{2M}{D} \left(\frac{1 - \sqrt{1 - \varepsilon_a}}{1 - \varepsilon_a} \right) \quad (2)$$

$$C_r = \frac{\sigma_c}{2} \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \quad (3)$$

Onde,

- σ_c Aumento da tensão de confinamento devido à geocélula;
- M Módulo de elasticidade da parede da geocélula;
- ε_a Deformação unitária circunferencial da parede da geocélula;
- ϕ Ângulo de atrito do material de preenchimento;
- C_r Pseudo-coesão induzida pela geocélula.

Isto se aplica diretamente a um aumento na resistência ao cisalhamento apenas na zona confinada influenciada pelo efeito de confinamento através da conhecida expressão de Coulomb.

$$\tau = c + \sigma_v \tan \phi + C_r \quad (4)$$

O estudo sobre o uso de geocélulas para melhorar o esforço de corte do solo revela que essas estruturas aumentam a resistência do solo, especialmente em materiais granulares sem coesão. As geocélulas confinam o solo, aumentando a carga vertical e gerando uma pseudo-coesão que contribui para a resistência ao cisalhamento. As equações desenvolvidas fornecem uma maneira conservadora e confiável de estimar esse

comportamento, sendo úteis para projetos geotécnicos com foco na segurança e eficácia. Até o momento existem mais testes e referências que apresentam maior resolução de resultados, porém, o que é mostrado pode ser suficientemente conservador do lado da segurança para fins de utilização na metodologia.

3 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

A fim de dimensionar e comparar as diversas soluções de contenção avaliadas, dois elementos foram uniformizados: a geometria das estruturas de contenção e as características do solo. Os cálculos foram realizados considerando uma gama de alturas para os muros, variando de 4 a 20 metros, sendo escolhido um solo de característica predominantemente arenosa, caracterizado por um peso específico de 18 kN/m^3 , um ângulo de atrito interno de 28° e uma coesão de 5 kPa .

Essa variedade de alturas permite explorar diferentes cenários e compreender como as características do solo e a altura do muro interagem para determinar os requisitos de estabilidade e dimensionamento. Ao compreender como esses parâmetros afetam os resultados dos cálculos, é possível ter mais informações, adaptando às soluções de engenharia para melhor atender às condições de cada projeto, garantindo a segurança e eficácia das estruturas. A Figura 2 demonstra uma representação da seção estudada, onde H é a altura do muro e L o comprimento horizontal da área solo de aterro tratado, assim como as opções disponíveis para a execução com faceamento em geocélulas.

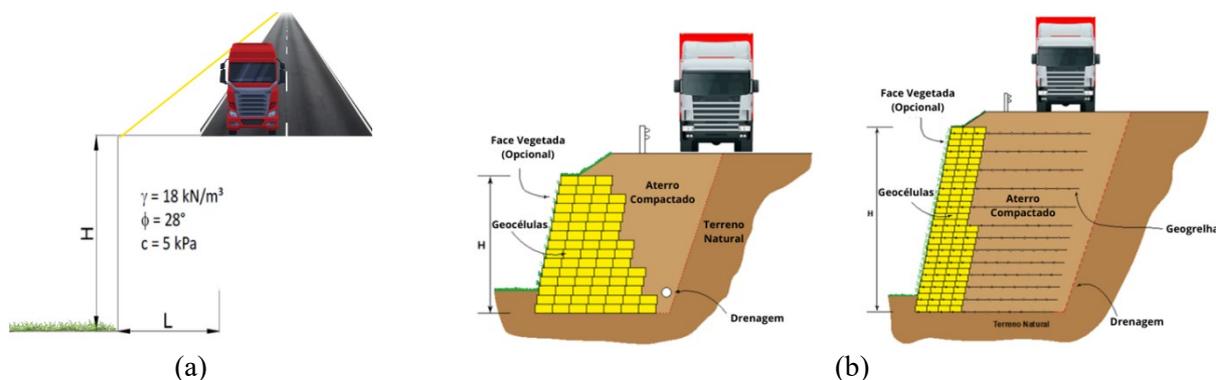


Figura 2. (a) Geometria e parâmetros geotécnicos adotados (b) Seção típica com muros em geocélulas, sem e com geogrelha.

3.1. Coeficientes de segurança

O estabelecimento dos fatores de segurança mínimos para garantir a estabilidade global e interna foi embasado nos critérios dados pela ABNT NBR 11682/2009, a qual regula a Estabilidade de Taludes. Sendo assim, adotou-se um valor mínimo de 1,5 para tais parâmetros.

3.2. Estabilidade Interna

A metodologia empregada para esta análise foi baseada na abordagem proposta pela AASHTO 98, *American Association of State Highway and Transportation Officials* implementada através do *software* MSEW (versão 3.0). Frente a isso, foram realizadas as análises, de maneira a otimizar os materiais utilizados nos muros de diferentes alturas.

Configurada a geometria e os parâmetros geotécnicos, para os estudos envolvendo geossintéticos, é de suma importância a consideração dos fatores de redução e interação com o meio. Para os fatores de redução, é importante se levar em consideração parâmetros como durabilidade, danos de instalação, químicos e biológicos, Creep, entre outros. Adicionalmente, também deve-se analisar os valores de adesão e ângulo de atrito do conjunto geossintético-solo. Os parâmetros mencionados, podem variar em função ao fabricante e resina base, e nos auxiliam a determinar a resistência de projeto do geossintético e valores de interface geossintético-solo, respectivamente. Na Figura 3 (a), são apresentados alguns valores, usualmente utilizados para estruturas de solo reforçado, assim como o resultado obtido pelo software, na Figura 3 (b).

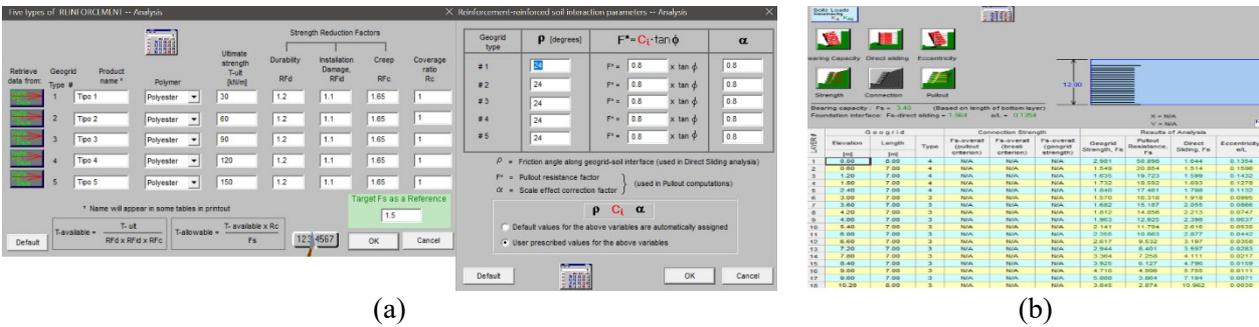


Figura 3. (a) Configurações dos parâmetros das geogrelhas no *software* MSEW (b) Dimensionamento estabilidade interna do muro de seção crítica com 12 m de altura.

A avaliação em *softwares*, nos permite uma análise camada por camada, proporcionando uma melhor compreensão da distribuição de esforços e dos fatores de segurança, auxiliando na tomada de decisões.

3.3. Estabilidade Global

As análises de estabilidade global, foram realizadas através do *software* Slide, abrangendo efeitos de cunha, segurança contra deslizamentos, tombamento e capacidade de carga da fundação.

Adicionalmente as análises convencionais para muros com faceamento em geocélulas, é importante a realização de análises de escorregamento entre as diversas camadas de geocélulas, a fim de medir, através de superfícies não circulares, qual será o comportamento da estrutura, quando a cunha de ruptura é induzida a passar pela região.

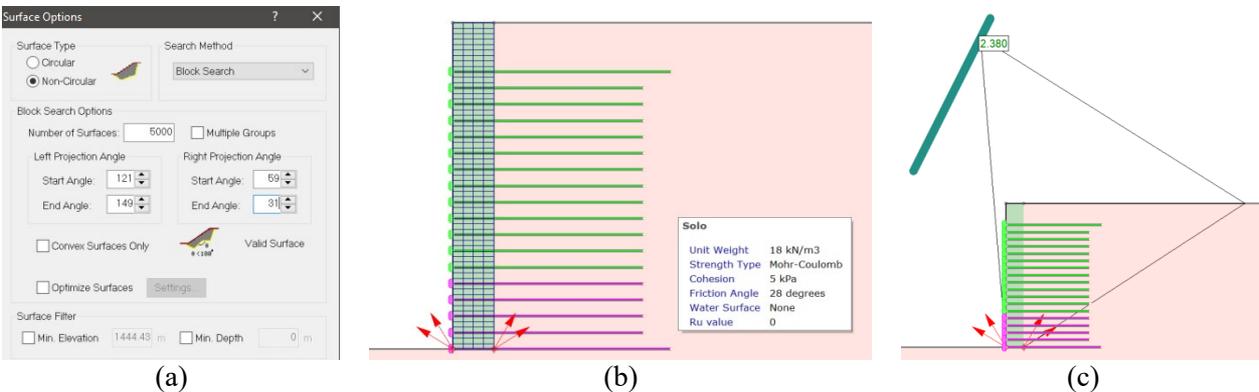


Figura 4. (a) Parâmetros para análises de escorregamentos (b) Inserção de pontos de análises (c) Análise executada pelo *software* Slide.

Essa análise pode ser repetida em vários pontos do muro a fim de observar se nos pontos críticos o coeficiente de segurança requerido é atendido em todos os pontos.

Para o presente estudo, os dimensionamentos, tanto do *software* Slide quanto do MSEW foram otimizados e compatibilizados, resultando em uma configuração única.

4 COMPARATIVO DE CUSTO DE MÃO DE OBRA

O dimensionamento dos demais muros apresentados, tomam como base os cálculos apresentados por Avesani Neto (2013).

Para estabelecimento de rendimentos médios e conformação das equipes foram considerados recomendações de profissionais e empresas especializados, a fim de estabelecer valores médios de referência e de custos com mão de obra com base no SICRO – SP de 2023, respectivamente, onde foi possível chegar a rendimento para a execução de cada um dos muros estudados, conforme Figura 5 (a).

Dada a configuração necessária da equipe, foi possível elaborar um levantamento do custo da hora e do mês trabalhado para cada um dos tipos de muros, conforme Figura 5 (b).

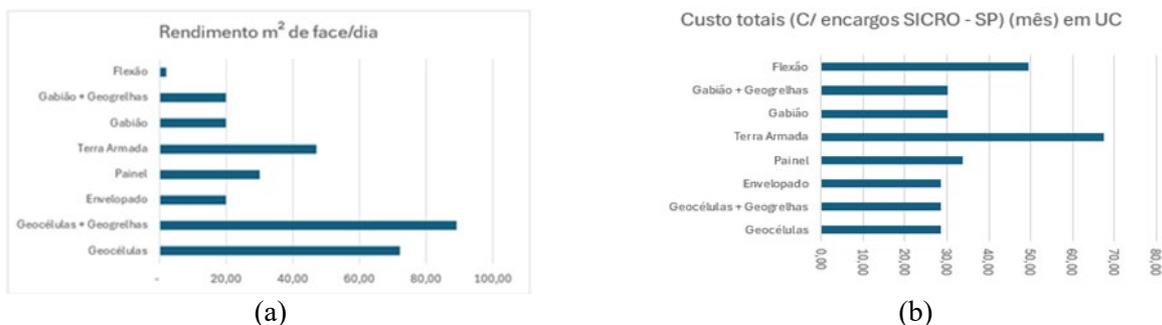


Figura 5. (a) Rendimento médio de face finalizada de muro por dia (b) Gráfico demonstrativo das oscilações de custos com mão de obra para cada tipo de contenção.

Dentre as soluções mais tradicionais, como muro por flexão e de gabião, se comparada à execução de muros com geossintéticos, pode-se observar uma grande economia em custo de mão de obra qualificada. Pode-se observar ainda que, devido ao fato das geocélulas de PEAD apresentarem maior rendimento, o custo por m² de face finalizada diminui significativamente.

5 COMENTÁRIOS GERAIS

A execução de muros de contenção com geocélulas de PEAD destaca-se pela eficiência na instalação e custos reduzidos de folha de pagamento, não necessitando de mão de obra especializada, além de apresentar maior rendimento. Por outro lado, a solução em solo envelopado, apesar de simples, enfrenta dificuldades na instalação devido à necessidade de escoramento da face, contribuindo para um menor rendimento e sendo suscetível a deformações, e vandalismo devido à camada de geotêxtil tecido em sua face.

Os muros em gabião e gabião com geogrelhas têm uma execução mais complexa, exigindo especialistas experientes e tornando a instalação mais lenta e custosa. Os muros em painéis e blocos são compostos por peças mais pesadas, dificultando o manuseio e reduzindo o rendimento. Requerem pelo menos dois colaboradores e um armador, além de um operador de equipamento pesado exclusivamente dedicado à construção do muro em painel. O muro em terra armada é mais complexo em termos de dimensionamento e execução, exigindo solo de granulometria específica e montagem das placas com o uso de equipamento pesado e mão de obra especializada, o que aumenta os custos. Por fim, o muro por flexão é a opção mais custosa, complexa e de menor rendimento, demandando mão de obra especializada, materiais caros, montagem de formas e tempo de espera para a cura do concreto, aumentando os custos com folha de pagamento.

Desta forma foi realizado comparativo de pontuação e classificação dos muros estudados, onde quanto maior a pontuação melhor e mais eficiente se mostra a solução baseada nos parâmetros descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação e pontuação dos muros estudados.

Tipo Muro	Geocélulas + Geogrelhas		Painel	Gabião + Geogrelhas		Terra Armada	Gabião	Flexão	Envelopado
	Solo Reforçado	Gravidade		Solo Reforçado	Gravidade				
Produtividade	10	9	8	6	6	6	5	1	9
Durabilidade	10	10	10	10	10	10	10	10	7
Segurança contra Vandalismo	9	9	9	7	10	7	10	10	1
Resistência contra fogo	3	3	8	9	8	9	9	8	1
Resistência contra cargas	10	10	9	10	10	10	10	10	7
Acabamento	9	9	9	6	9	6	6	8	4
Versatilidade	10	10	4	6	2	4	4	3	8
Flexibilidade	10	9	7	8	4	7	7	5	9
Drenagem	10	10	8	10	9	10	10	7	10
Estética	9	9	9	7	9	7	7	8	3
Melhoria do Ambiente	10	10	8	9	8	9	9	5	7
Isolamento Térmico	7	7	8	6	8	6	6	8	3
Aumento da Biodiversidade	10	10	2	8	2	8	8	2	7
Resistência ao som	6	6	7	4	7	4	4	7	3
Diminuição de Manutenção	9	9	8	7	8	7	7	9	2
Resistência a Intempéries	10	10	10	7	10	7	7	10	6
Integração ao meio ambiente	9	9	4	7	4	7	7	4	6
Economia	9	8	6	4	5	4	4	1	10
Facilidade de instalação	10	10	6	7	4	7	7	1	8
Total	160	157	134	131	129	127	127	116	103
Ranking	1°	2°	3°	4°	5°	6°	6°	7°	8°

A fim de se realizar um comparativo de custos entre as soluções, elaborou-se um gráfico com base nos estudos e dimensionamentos realizados, onde em função a altura do muro (em metros), tem-se o custo, em Unidade de Custo (UC), conforme Figura 6.

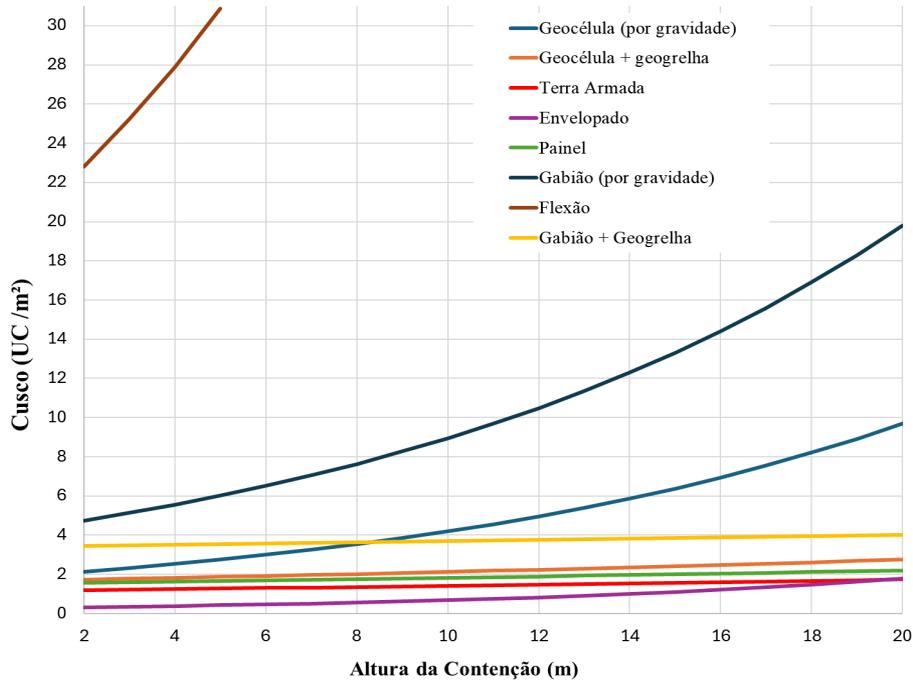


Figura 6. Custo UC m² versus altura da estrutura de contenção.

6 CASOS DE OBRAS

Há muita experiência, de aplicação de muros com faceamento em geocélulas, trabalhados no mundo e na América Latina, tendo-se trabalhos realizados com esta técnica desde os anos 2000. Países, localizados em áreas tropicais, são locais onde, devido à escassez e/ou volume reduzido de pedras, são casos onde os benefícios da solução se tornam ainda mais relevantes. Alguns são apresentados na continuação.

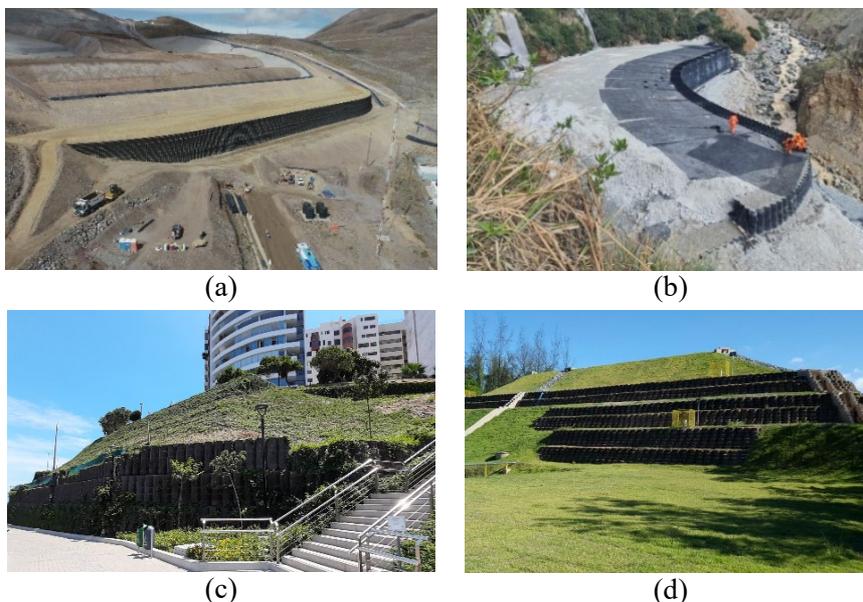


Figura 7. (a) Estrutura de contenção para britador, Chile (b) Estrutura de proteção de margem, Peru (c) Estrutura de contenção Parque Bicentenário, Peru (d) Estrutura de alteamento reforçado, Brasil.

7 CONCLUSÃO

A utilização de geocélulas em muros de contenção oferece vantagens técnicas, econômicas e ambientais em comparação às soluções tradicionais. O preenchimento das geocélulas com solo local reduz a necessidade de materiais de empréstimo, minimizando o impacto ambiental. Além disso, melhora os parâmetros de coesão do solo, aumentando a capacidade de carga e resistência ao corte.

Os muros de contenção com geossintéticos, especialmente geocélulas de PEAD, se destacam pela eficiência na instalação, demandando menos mão de obra especializada e apresentando maior rendimento em comparação com soluções como muros por flexão, gabião e gabião com geogrelhas.

Algumas soluções tradicionais, como muros de terra armada, podem ser mais dispendiosas devido à necessidade de solo específico, aumento de custos com materiais e montagem de formas.

Os muros de contenção com geocélulas representam uma alternativa viável e vantajosa, contribuindo para infraestrutura resiliente e sustentável. Esses promovem eficiência, economia e podem impulsionar o avanço da engenharia geotécnica.

Os muros construídos com geossintéticos, especialmente em geocélulas de PEAD, são mais produtivos devido à leveza dos materiais e montagem simplificada. Não há necessidade de esperar pelo tempo de cura do concreto, quando solos e brita são usados para o preenchimento. No entanto, o rendimento pode ser menor no caso do solo envelopado devido à necessidade de escoramento na face para reduzir deformações.

Para garantir a eficácia da solução, se fazem necessárias características como perfurações e texturas, dadas no modelo estudado pelo Instituto de Geossintéticos, GRI-GS15, juntamente à ASTM D8269.

AGRADECIMENTOS

Um agradecimento especial aos profissionais da área da construção civil que gentilmente compartilharam seus conhecimentos e experiências durante o processo de pesquisa. Suas perspectivas enriqueceram significativamente este artigo e forneceram insights valiosos sobre o tema das contenções. Também ao Grupo TDM, pela disponibilização de fotos e documentos para comprovação da solução, através de fotos e informações casos executados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). ABNT NBR 11682: Estabilidade de Taludes. São Paulo.
- ASTM International (2021). ASTM D 5321-12: Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear.
- ASTM International (2021). ASTM D 8269-21: Standard Guide for the Use of Geocells in Geotechnical and Roadway Projects.
- AASTHO (1998). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Bathurst R., Karpurapu R. (1993), "Large-Scale Triaxial Compression Testing of Geocell-Reinforced Granular Soils", *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, 16-3 (1993): 296-303.
- Geosynthetic Research Institute (GRI) (Sem data). GRI-GS15: Test Methods, Test Properties and Testing Frequency for Geocells Made From High Density Polyethylene (HDPE) Strips.
- Koerner R. (2005), "Designing with Geosynthetics", Fifth Edition, Ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005, pp. 750-754.
- Avesani Neto, J. O. (2013). Levantamento e comparação dos custos de diferentes soluções de estruturas de contenção em aterro. VI Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas.
- Sistema de Custos Referenciais de Obras - SICRO - SP (2023). São Paulo.