

Estudo Comparativo de Solo Reforçado com Geocélula Convencional e Geocélula Confeccionada com Garrafa PET

Jéssica Horta Menezes Barros

Msc. Engenheira Civil, Universidade Federal de Sergipe, Aracaju, Brasil, jessicahorta.civil@gmail.com

Guilherme Bravo de Oliveira Almeida

Professor Dsc., Universidade Federal de Sergipe, Aracaju, Brasil, gbravo1982@gmail.com

Emiliana de Souza Rezende Guedes

Professor Dsc., Instituto Federal de Sergipe, Aracaju, Brasil, emiliana.guedes@ifs.edu.br

Geverson de Jesus Moura

Msc. Engenheiro Civil, Instituto Federal de Sergipe, Aracaju, Brasil, geverson.moura@gmail.com

RESUMO: Ao considerar a crescente demanda por espaço devido ao rápido crescimento populacional e expansão industrial, a necessidade de técnicas de melhoramento de solos para viabilizar construções em locais desfavoráveis se torna evidente. Este estudo aborda a utilização de geocélulas como uma alternativa para reforçar fundações, destacando a busca por soluções ambientalmente conscientes, como a reciclagem de garrafas PET na construção civil. O objetivo principal foi avaliar o desempenho mecânico de geocélulas feitas de PET. Para isso, foi desenvolvido um equipamento de ensaios de carga estática e um cortador de tiras circulares. Os ensaios envolveram comparar geocélula convencional com geocélulas de PET em alturas de 5 e 10 cm. Ao analisar as variações de tensão aplicada, os resultados revelaram que tanto a geocélula convencional quanto as de PET promoveram um aumento significativo na resistência do solo, com aumentos de tensão de 116% para a convencional, 127% para a de PET de 5 cm e 207% para a de 10 cm. Isso indica uma possibilidade de utilização das geocélulas de PET como uma solução eficaz e sustentável para o reforço de solos em projetos de construção civil.

PALAVRAS-CHAVE: Geossintéticos, Reforço de Solo, Geocélula, PET.

ABSTRACT: When considering the growing demand for space due to rapid population growth and industrial expansion, the need for soil improvement techniques to enable construction in unfavorable locations becomes evident. This study addresses the use of geocells as an alternative to reinforce foundations, highlighting the search for environmentally conscious solutions, such as recycling PET bottles in construction. The main objective was to evaluate the mechanical performance of geocells made from PET. For this, equipment for static load testing and a circular strip cutter were developed. The tests involved comparing conventional geocells with PET geocells at heights of 5 and 10 cm. When analyzing the variations in applied tension, the results revealed that both the conventional and PET geocells promoted a significant increase in soil resistance, with tension increases of 116% for the conventional one, 127% for the 5 cm PET one and 207% for the 10 cm one. This indicates the possibility of using PET geocells as an effective and sustainable solution for soil reinforcement in civil construction projects.

KEYWORDS: Geosynthetics, Soil reinforcement, Geocell, PET.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de empreendimentos segue etapas, desde a definição dos projetos até a entrega final do produto. Os projetos preliminares permitem avaliar o sucesso da empreitada, considerando as condições geotécnicas do local, muitas vezes desfavoráveis, o que demanda o reforço do solo (Menezes, 2004).

O avanço dos geossintéticos introduziu sistemas como as geocélulas, que oferecem confinamento tridimensional ao solo, aumentando sua resistência ao cisalhamento e permitindo seu uso em locais desafiadores (Bomfim, 2019). Particularmente no caso de obras sobre solos moles, a utilização de geocélulas pode muitas vezes ser bastante vantajosa. Soluções tradicionais como a retirada e substituição do material mole podem ser prescindidas pela sua utilização (Bomfim, 2019).

Não obstante, a cadeia produtiva da construção civil é responsável pela transformação do ambiente natural em ambiente construído que precisa ser permanentemente atualizado e mantido. E, por isso, é necessária uma maior conscientização das questões ambientais e políticas estatais sobre preservação ambiental que vêm fazendo com que surjam novas propostas de reciclagem e redução de resíduos gerados (John, 1996).

Entre os benefícios ambientais, merece destaque a redução do volume de garrafas nos aterros. Um levantamento realizado por CEMPRE (2020) mostrou que 23,1% de todo plástico produzido no Brasil, pós-consumo foram recicladas, totalizando 224 mil toneladas. E o volume de PET reciclado seguiu crescendo em 2022. De 1994 a 2002, o percentual de reciclagem das embalagens PET pós-consumo no Brasil subiu de 19% para 35% do total comercializado. De 2003 a 2006 subiu de 43% para 51% e desde então a alta anual tem variado de 1,5 % a 2,0 %. Em 2022, o percentual de reciclagem foi 53,6%. (PICPLAST, 2023)

Diante disso, estão as tentativas de utilização das garrafas de PET na construção civil, sempre com o intuito de minimizar os custos e redução de impacto ambiental. Diversos experimentos estão sendo realizados, como por exemplo: a utilização de garrafas PET para constituir superfícies refletoras para ambientes enclausurados (Fantinelle, 2008) e a substituição de blocos convencionais na produção de lajes nervuradas (Brocaneli et al., 2008)

Neste contexto, esta pesquisa utiliza a garrafa PET cortada em tiras circulares empregadas na produção de geocélulas, com definições reduzidas em relação à geocélula convencional. A hipótese deduzida é que, quando as geocélulas confeccionadas estiverem preenchidas com areia, comportam-se como uma placa sob efeito de confinamento, laje e membrana, distribuindo as cargas uniformemente. Consequentemente, haverá um aumento na capacidade de suporte.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Equipamento de prova de carga

Para determinar a capacidade de carga foi construído um equipamento de prova de carga com os seguintes elementos: pórtico de reação, caixa de ensaios, sistema de aplicação de carga e instrumentação.

O pórtico é uma estrutura composta por uma viga metálica em perfil "I" parafusada em dois pilares, projetada para suportar cargas de até 10 toneladas. Para confinar o solo, uma caixa foi construída com duas placas de madeira compensada, resultando em uma espessura final de 4 cm, reforçada e travada com caibros de madeira e perfis metálicos em "U". A superfície interna da caixa foi pintada e o carregamento do solo foi realizado com um macaco hidráulico monitorado por um anel dinamométrico, enquanto três relógios comparadores foram utilizados para monitorar os recalques durante o ensaio (Figura 1).

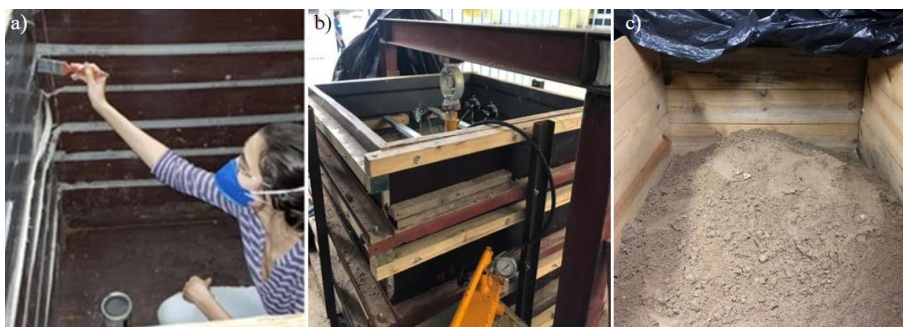


Figura 1. a) Detalhe das marcações das camadas de solo; b) Visão geral dos instrumentos utilizados; c) Baía de condicionamento do solo utilizado.

2.2 Geocélula de garrafa de PET

Como elemento de reforço do solo procurou-se utilizar uma geocélula não-convencional a partir de garrafas PET com geometria circular. Dessa forma, foi desenvolvido um cortador de tiras circulares de PET com peças encontradas no ferro velho para facilitar o corte com maior eficiência e precisão (Figura 2a). O cortador de PET possui uma lâmina e suporte para fixação do material, com um anel de acrílico interno (9,9 cm de diâmetro) para evitar flexibilidade, permitindo cortes precisos ao girar a manivela.

As geocélulas foram feitas com garrafas PET de 2 litros, selecionando aquelas com diâmetro uniforme. A montagem ocorreu com cola instantânea devido à sua rápida cura, enquanto as dimensões almejadas foram 100 x 100 x 5 cm e 100 x 100 x 10 cm (L x C x A), adequadas à caixa de confinamento (Figura 2b).

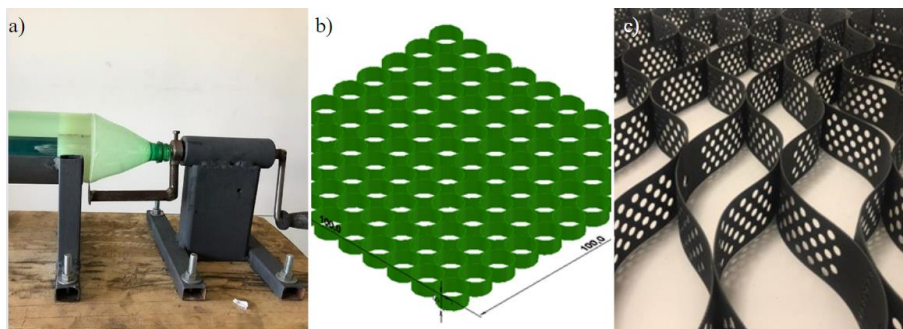


Figura 2. a) Garrafa PET no cortador de tiras; b) Esquema da geocélula de PET; c) Geocélula convencional.

2.3 Geocélula convencional

Para comparar os resultados do comportamento da geocélula de PET, foi analisado o solo reforçado com uma geocélula convencional (Figura 2c), fabricada com resina virgem de Polietileno de Alta Densidade (PEAD). Essa geocélula possui um design tipo colmeia de abelhas, com faixas conectadas por linhas de solda ultrassônica, paredes texturizadas e perfuradas para aumentar o atrito com o material de preenchimento. A tela foi cortada com dimensões idênticas à geocélula de PET (100 x 100 cm), e os detalhes técnicos do modelo estão na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas da geocélula convencional utilizada nesta pesquisa.

Propriedades Físicas	Valor	Unidade
Espessura nominal da parede	1,25 (-10%)	mm
Espessura total (incluindo textura)	1,50 (- 5% + 10%)	mm
Diâmetros de perfurações	10	mm
Altura da célula	75 (\pm 2%)	mm
Dimensões da célula	259 x 224 (\pm 2%)	mm

2.4 Caracterização do solo

Para compor o solo de fundação foi utilizado um total de 1.900 kg, proveniente da área de estoque de materiais do Instituto federal de Sergipe (Figura 1c). Os seguintes ensaios foram executados: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água de grãos de pedregulho (NBR 6458, 2017); análise granulométrica do solo (NBR 7181, 2018); determinação do limite de liquidez do solo (NBR 6459, 2017); determinação do limite de plasticidade do solo (NBR 7180, 2016).

2.5 Ensaios de prova de carga

A prova de carga foi realizada seguindo as recomendações da NBR 6489 (2019), com exceção na dimensão da placa (área não inferior a 0,5 m²), visto a limitação dada pela caixa de ensaio. A placa utilizada tem 30 cm de diâmetro.

Os reforços foram deliberadamente colocados nos primeiros 15 cm, seguindo a sugestão de Dash et al. (2001) de que o topo do reforço deve estar próximo da superfície. Isso ocorre porque ao posicionar a geocélula a essa profundidade, a carga é distribuída em uma área maior, evitando o contato direto da parede da célula com a placa e prevenindo flambagem inicial. Aumentar a profundidade de assentamento pode resultar em recalque do solo entre a placa e a geocélula, reduzindo a eficácia do reforço. A Figura 3 ilustra o posicionamento dos materiais de reforço na caixa de ensaios, proporcionando uma melhor compreensão da configuração e disposição das camadas ao longo do perfil da caixa.

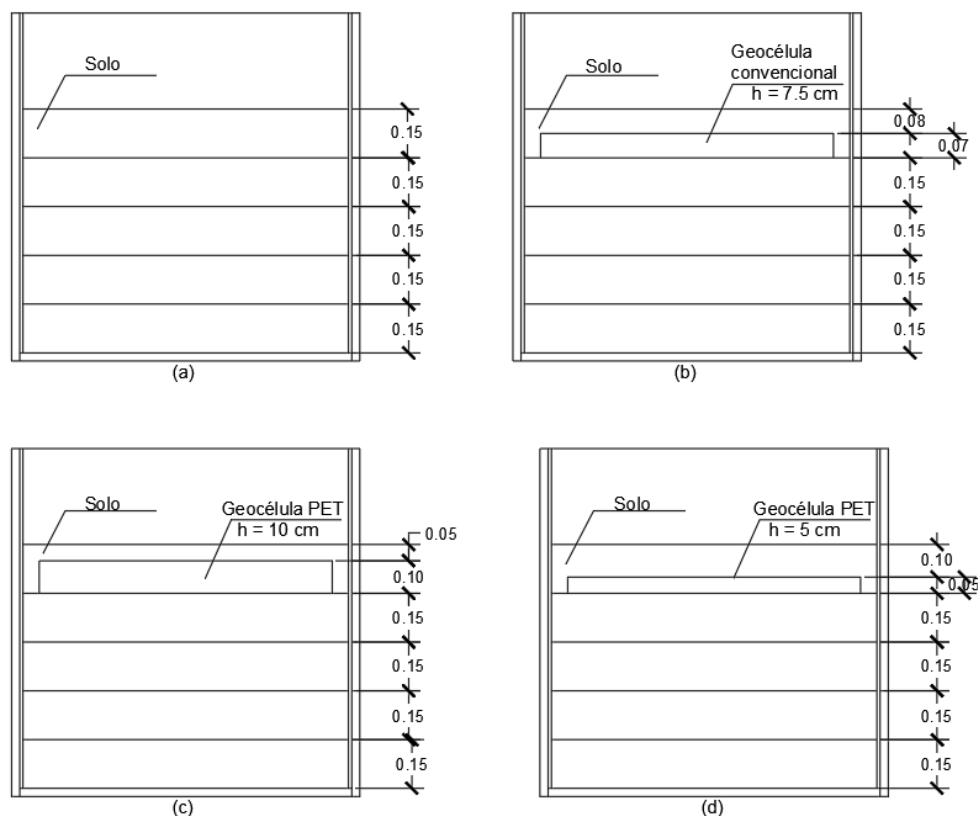


Figura 3. Posicionamento dos materiais de reforço: (a) solo sem reforço, (b) solo com geocélula convencional, (c) solo com geocélula $h = 10$ cm e (d) solo com geocélula $h = 5$ cm.

2.6 Preparação das amostras

Os ensaios foram conduzidos mediante o preenchimento da caixa e a compactação do solo em camadas de 15 cm, atingindo uma altura final de 75 cm em todos os experimentos. A determinação da massa de solo/camada teve por base a umidade higroscópica, a massa específica dos sólidos e nos índices máximo e mínimo de vazios. Esses parâmetros possibilitaram o cálculo da densidade relativa, estabelecido em 85%. Tal escolha foi condicionada pela capacidade de compactação manual com os equipamentos disponíveis.

No procedimento de compactação foi utilizado um soquete manual de madeira com massa de 6,5 Kg e altura de queda de 30 cm. A Figura 4 apresenta as etapas de preenchimento da caixa com o solo. Após compactar a quarta camada, o reforço foi instalado. Ao atingir a altura de 75 cm, a instrumentação foi instalada, o ensaio iniciado e finalizado seguindo as diretrizes da norma (NBR 6489, 2019), até que atingisse um recalque de 25mm.



Figura 4. Preenchimento da caixa de ensaios: (1) determinação da massa do solo, (2) – (3) lançamento do solo em camadas, (4) distribuição do solo, (5) nivelamento e (6) compactação do solo.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 Caracterização do solo

A curva granulométrica do solo utilizado no estudo é apresentada na Figura 5, o que indica frações de 4,06% de pedregulho, 90,53% de areia e 5,41% de silte e argila. De acordo com a classificação SUCS, é caracterizado como uma areia mal graduada com silte (SP-SM), apresentando um coeficiente de uniformidade (C_u) de 2,72 e um coeficiente de curvatura (C_c) de 1,05. Rajagopal et al. (1999) destacam que solos granulares são ideais para preenchimento devido ao aumento da coesão sob confinamento, promovendo melhor capacidade de carga e distribuição de tensões no solo de fundação. Ainda, o solo apresenta massa específica dos sólidos de $2,66 \text{ g/cm}^3$, com índices de vazios mínimo e máximo de 0,508 a 1,956, respectivamente.

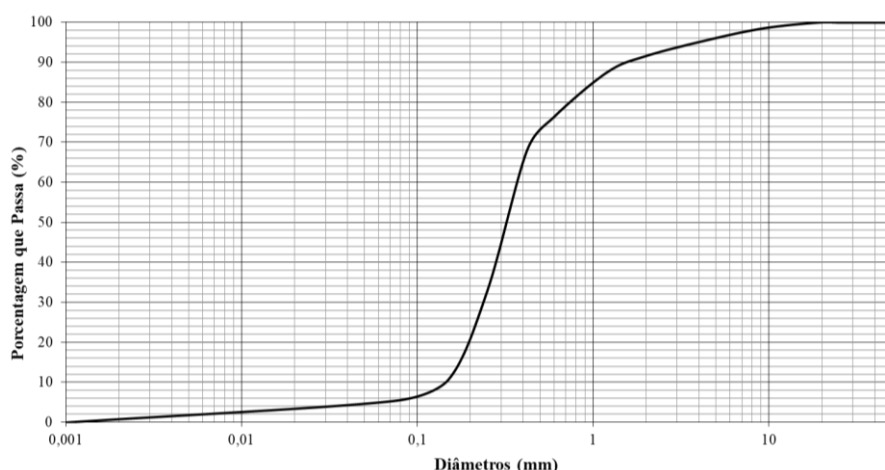


Figura 5. Curva granulométrica do solo

3.2 Comparativo entre as configurações de reforço

A Figura 6 apresenta os resultados da curva tensão x recalque dos ensaios sem reforço (S), solo com geocélula convencional (SGC1), solo com a geocélula de altura de 5 cm (SGCP1) e solo com a geocélula de altura de 10 cm (SGCP2). Percebe-se que há um aumento na capacidade resistente do solo na presença da geocélula convencional. Há uma elevação da tensão de ruptura de 221,4 KPa (S) para 477,4 kPa (SCG1), dessa forma a porcentagem de ganho de resistência é igual a 116 %. Estudos anteriores, como o de Mhaiskar &

Mandal (1996), indicam que a densidade relativa da areia influencia no desempenho do reforço, com melhorias observadas em solos mais compactos. Dash et al. (2001) atribui tal desempenho, também, ao aumento no atrito entre as partículas e as paredes da geocélula, e à maior dilatação que os mesmos apresentam, de forma a transferir as tensões do solo para a geocélula.

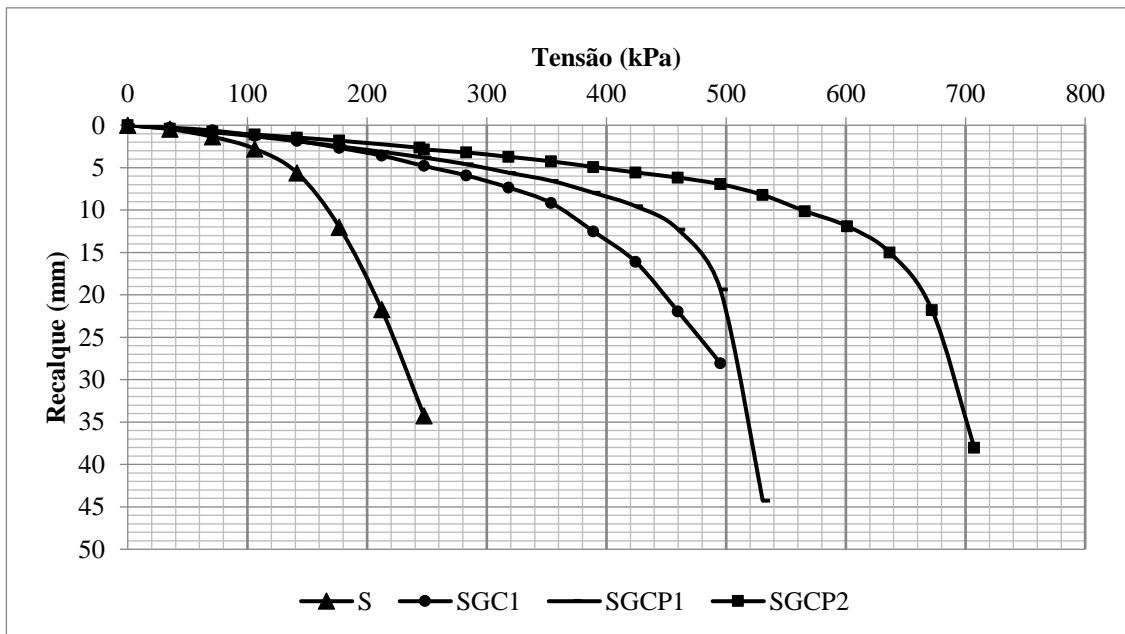


Figura 6. Comparativo entre todas as soluções de reforço.

Análises das geocélulas de PET mostraram aumentos de 130% e 210%, aproximadamente, na tensão de ruptura em relação ao solo puro, com alturas de geocélula de 5 cm e 10 cm, respectivamente. Comparando com estudos anteriores, como o de Meneses (2004), observou-se que o aumento da altura da geocélula implica em maior capacidade de carga e redução dos recalques, especialmente até uma altura igual ao dobro da largura da base ou diâmetro, sendo que acima desse ponto, o aumento no desempenho é marginal (Dash et al., 2001).

A Tabela 2 apresenta o resumo da capacidade de carga. O ganho de resistência máximo, das situações propostas, quando comparado ao solo sem reforço, é de cerca de 207% (SGCP2). Além disso, mesmo a geocélula convencional apresentou um ganho de resistência menor que a geocélula PET de 5,0 cm, destacando a influência do tamanho das células na capacidade de carga do reforço (Dash et al., 2001). O que pode ser atribuído nesse ganho de resistência são às células menores das geocélulas confeccionadas, como a SGCP1, as quais proporcionam maior confinamento do solo, aumentando sua resistência ao cisalhamento e flexão devido ao maior número de colmeias por unidade de área.

Tabela 2. Resumo dos resultados para um recalque de 25 mm.

Configuração	Material	Ensaio	Tensão (kPa)	% de ganho de resistência
Sem reforço	Areia	S	221,4	-
Solo reforçado	Areia + Geocélula convencional h= 7,5 cm	SGC1	477,4	116
	Areia + Geocélula PET h= 5,0 cm	SGCP1	503,2	127
	Areia + Geocélula PET h= 10,0 cm	SGCP2	679,0	207

Na confecção de geocélulas, é comum analisar a altura e largura das células, sendo o índice adimensional resultante da divisão dessas medidas (h/d) um parâmetro crucial, conhecido como razão de forma ou fator de forma (Avesani, 2013), como detalhado na Tabela 3. A comparação entre as Tabelas 2 e 3 revela que a geocélula SGC1 possui um fator de forma (Ff) de 0,29, enquanto a SGCP1 registra 0,50. A observação dessa relação indica que um fator maior está correlacionado a uma maior resistência, corroborando estudos anteriores de Mandal & Gupta (1994) e Dash et al. (2001), assim como as conclusões de Meneses (2004) sobre a eficácia das geocélulas no reforço de solos arenosos e moles.

Tabela 3. Razão de forma - Ff (h/d).

Geocélula	Altura (h) m	Largura da célula (d) - m	Ff (h/d)
SGC1	0,075	0,26	0,29
SGCP1	0,05	0,10	0,50
SGCP2	0,10	0,10	1,00

Na análise do sistema de reforço, a relação entre a abertura da célula (d) e o diâmetro da placa (D) é crucial. Segundo Rai (2010) e Dash et al. (2003), essa relação deve ser menor que 0,8 para garantir uma cobertura eficaz da célula pela placa. No presente estudo, todas as configurações de reforço atendem a essa condição, com a célula convencional apresentando abertura média de 24 cm e a de PET, 10 cm, enquanto a placa possui diâmetro de 30 cm. É relevante notar que a quantidade de células cobertas pela placa foi maior com a geocélula de PET, evidenciando sua influência no desempenho do reforço, pois a placa abrange a dimensão da célula. Por outro lado, na geocélula convencional, a quantidade de células cobertas foi maior que uma porém, não abrangendo duas células consecutivas em contato com placa.

É possível avaliar, também, o desempenho dos sistemas reforçados com geocélulas através do fator adimensional (Fd), que representa a relação entre a carga aplicada sobre o sistema reforçado (q_r) e o equivalente não reforçado (q_0) para um determinado valor de recalque (Dash et al., 2003). Os resultados estão detalhados na Tabela 4, fornecendo uma visão clara da eficácia do reforço com geocélulas.

Tabela 4. Fator adimensional Fd e a carga equivalente aplicada sobre o solo não reforçado.

Recalque (mm)	SGC1	SGCP1	SGCP2	S
	Fd (%)			q_0
5	1,90	2,22	2,94	9,46
10	2,19	2,60	3,40	11,71
15	2,20	2,52	3,39	13,27
20	2,18	2,41	3,22	14,55
25	2,16	2,27	3,07	15,65

Os valores de Fd revelam que o reforço pode aumentar a capacidade de carga do sistema em até 3,4 vezes (SGCP2) para recalques de até 10 mm e cerca de 3,1 vezes (GCP2) para recalques de 25 mm, enquanto sempre eleva a capacidade de carga em pelo menos 1,9 vezes em todas as configurações.

3 CONCLUSÕES

O estudo buscou avaliar o desempenho mecânico de uma geocélula feita de garrafas PET por meio de ensaios experimentais e análises geotécnicas. Os resultados revelaram que, para um recalque de 25 mm, as geocélulas confeccionadas com garrafa PET apresentaram ganhos de resistência superiores à geocélula convencional. Apesar das tensões mais altas na geocélula de PET, as relações h/d e d/D explicam os resultados favoráveis, indicando que a escala de tamanho da colmeia da geocélula de PET foi maior. A análise sugere que geocélulas mais altas e com mais colmeias na projeção da placa oferecem maior confinamento e resistência do solo reforçado. Assim, os resultados indicam uma possibilidade de a geocélula de PET ser uma alternativa viável como material geossintético. Porém, são necessários estudos mais detalhados sobre seu método de ligação, variações de dimensão e durabilidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos professores, alunos e técnicos do Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UFS e do IFS, por toda a infraestrutura disponibilizada durante a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 6458: *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 6459: *Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 6489: *Prova De Carga Direta Sobre Terreno De Fundação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180: *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR 7181: *Solo: Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Avesani, J. O. N. (2013). *Desenvolvimento de uma metodologia de cálculo e simulações numéricas aplicadas na melhoria da capacidade de carga de solos reforçados com geocélula*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo/USP, 336p.
- Bomfim, T. A. dos S. (2019). *Estudo de Materiais de Preenchimento para Geocélula de Tubos de PVC*. Dissertação de Mestrado, Coordenadoria de Engenharia civil. Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Sergipe - Campus Aracaju, 62p.
- Brocaneli, P. F., Stuermer, M. M., & Vieira, J. H. (2008). *Lâmpadas de Água - Litros Transformados em LUX(Z)*. São Paulo, 2008.
- CEMPRE. (2020). *Taxas de Reciclagem*. São Paulo, 2020. Disponível em: <<https://cempre.org.br/taxas-de-reciclagem/>>. Acesso em: 13 fev. 2024.
- Dash, S. K., Rajagopal, K., & Krishnaswamy, N. R. (2001). *Strip footing on geocell reinforced sand beds with additional planar reinforcement*. *Geotextiles and Geomembranes*, 19(8), 529–538.
- Dash, S. K., Saride, S., & Sitharam, T. G. (2003). *Model studies on circular footing supported on geocell reinforced sand underlain by soft clay*. *Geotextiles and Geomembranes*, 21(4), 197–219.
- Fantinelle, J. T. (2008). *A Iluminação Natural Através De Dutos De Sol Em Ambientes Enclausurados*. II Encontro de Sustentabilidade Em Projeto Do Vale Do Itajaí, Maceió, 1–10, abril, 2008.
- John, V. M. (1996). *Pesquisa E Desenvolvimento De Mercado Para Pesquisa*. In: *Reciclagem E Reutilização De Resíduos Como Material De Construção Civil*. São Paulo. Vol.1. P. 21-30. abril, 1996.
- Mandal, J. N., & Gupta, P. (1994). *Stability of geocell-reinforced soil*. *Construction and Building Materials*, 8(1), 55–62. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(94\)90009-4](https://doi.org/10.1016/0950-0618(94)90009-4)
- Meneses, L. A. de. (2004). *Utilização de Geocélulas em reforço de solo mole*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia, Universidade de São Paulo/USP, 99p.
- Mhaiskar, S. Y., & Mandal, J. N. (1996). *Investigations on soft clay subgrade strengthening using geocells*. *Construction and Building Materials*, 10(4), 281–286. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00083-6](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00083-6)
- PICPLAST (2023). *Monitoramento Dos Índices De Reciclagem Mecânica De Plásticos Pós Consumo No Brasil*. Disponível em:<https://www.picplast.com.br/portal/picplast/arquivos/Estudo%20e%20Reciclagem/Indices%20Reciclagem%202022_PICPlast_Webinar_20out23_Revisado_2.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2024
- Rai, M. (2010). *Geocell-sand mattress overlying soft clay subgrade: Behavior under circular loading*. Tese de Doutorado em Engenharia civil. Indian Institute of Technology Guwathati, India, 261p.
- Rajagopal, K., Krishnaswamy, N. R., & Madhavi Latha, G. (1999). *Behaviour of sand confined with single and multiple geocells*. *Geotextiles and Geomembranes*, 17(3), 171–184. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(98\)00034-X](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(98)00034-X)