*XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*
*XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens*
*24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF*
**DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/27**

# Comportamento ao arrancamento de uma geogrelha embutida em areia de Fresado de Pavimento Asfáltico (RAP)

Mateus P. Fleury
Professor Substituto, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, Brasil, mateus.fleury@ufscar.br

Saurav S. Kar
Professor, COEP Technological University (COEP Tech), Pune, India, karsauravshekhar2008@gmail.com

Fernando H. M Portelinha
Professor Titular, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, Brasil, fernando.portelinha@ufscar.br

RESUMO: Este estudo avalia o desempenho ao arrancamento de uma geogrelha biaxial embutida em resíduo de pavimento asfáltico fresado (RAP) e em areia natural, com o objetivo de analisar a viabilidade do uso do RAP como material de preenchimento em estruturas de solo reforçado com geossintéticos. Ensaios de arrancamento em caixa de grande escala foram realizados sob tensões normais de 25, 50 e 100 kPa. A resistência ao arrancamento, o deslocamento axial e a distribuição de deformações ao longo da geogrelha foram monitorados por meio de instrumentação externa e interna. Os resultados indicam que, embora a resistência ao arrancamento aumente com a tensão normal para ambos os materiais, a interface areia–geogrelha apresentou maior sensibilidade ao confinamento. Em contrapartida, o RAP mobilizou maiores resistências últimas ao arrancamento, exigindo maiores deslocamentos axiais e desenvolvendo maiores deformações internas na geogrelha. A interpretação dos parâmetros de interface segundo o critério de Mohr–Coulomb revelou comportamento predominantemente friccional para a areia, enquanto o RAP apresentou significativa adesão aparente, associada ao ligante asfáltico residual e ao maior intertravamento entre partículas. Os resultados demonstram que o RAP pode proporcionar condições favoráveis de interação solo–geogrelha em aplicações de solo reforçado, contribuindo para o desenvolvimento de infraestruturas geotécnicas mais sustentáveis.

PALAVRAS-CHAVE: Comportamento ao Arrancamento, Geogrelha de PEAD, Fresado de Pavimento Asfáltico, Interação Solo–Geogrelha, Resistência de Interface, Estruturas de Solo Reforçado

ABSTRACT: This study evaluates the pull-out performance of biaxial geogrid embedded in reclaimed asphalt pavement (RAP) and natural sand, with the objective of assessing the suitability of RAP as a backfill material in geosynthetic-reinforced soil structures. Large-scale laboratory pull-out tests were performed under normal stresses of 25, 50 and 100 kPa. Pull-out resistance, axial displacement and strain distribution along the geogrid were monitored using external and internal instrumentation. The results indicate that, although pull-out resistance increased with normal stress for both materials, the sand–geogrid interface exhibited greater sensitivity to confinement. In contrast, RAP mobilised higher ultimate pull-out resistance, requiring larger axial displacements and developing greater internal geogrid strains. Interpretation of the interface parameters using a Mohr–Coulomb envelope revealed a predominantly frictional response for sand, whereas RAP exhibited significant apparent adhesion associated with residual asphalt binder and enhanced particle interlocking. The findings demonstrate that RAP can provide favourable interface conditions in reinforced soil applications, supporting its use as an alternative backfill in sustainable geotechnical infrastructure.

KEYWORDS: Pull-out Behaviour, HDPE Geogrid, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), Soil–geogrid Interaction, Interface Shear Strength, Reinforced Soil Structures.

## 1 INTRODUÇÃO

Os geossintéticos têm sido amplamente utilizados em todo o mundo como soluções técnicas e economicamente eficientes em aplicações da engenharia geotécnica, incluindo reforço de solos, estabilização de fundações, obras de contenção, infraestrutura ferroviária e rodoviária e controle de erosão (Wu et al., 1992; Ashmawy e Bourdeau, 1995; Lee e Wu, 2004; Ravi et al., 2014; Ferreira et al., 2016; Indraratna et al., 2018). Entre os diferentes geossintéticos, as geogrelhas destacam-se em estruturas de solo reforçado devido à elevada rigidez, resistência à tração e capacidade de intertravamento com o material de preenchimento.

No projeto de estruturas de solo reforçado, um dos aspectos mais relevantes é o mecanismo de interação entre o solo e o elemento de reforço. O desempenho global dessas estruturas depende diretamente da mobilização adequada da resistência de interface, a qual pode ser influenciada pelas propriedades físicas e mecânicas do solo, pelas características geométricas e mecânicas da geogrelha, bem como pelas condições de confinamento (Ferreira et al., 2015). A interação solo–geossintético pode ser avaliada por diferentes métodos experimentais, sendo os ensaios de cisalhamento direto e de arrancamento os mais empregados (Mendes et al., 2007; Lopes et al., 2014; Ferreira et al., 2016). Dentre esses, o ensaio de arrancamento em laboratório tem sido amplamente adotado para a determinação da resistência ao arrancamento de geogrelhas em estruturas de solo reforçado.

Diversos estudos investigaram o comportamento ao arrancamento de geossintéticos sob diferentes condições de confinamento e tipos de solo, demonstrando a relevância da mobilização de mecanismos atritivos e de resistência passiva associados às fibras transversais das geogrelhas (Palmeira, 2004; Hatami e Esmaili, 2015). Entretanto, a maior parte das investigações foram conduzidas com agregados naturais ou solos granulares convencionais.

Paralelamente, a engenharia civil tem sido desafiada a propor soluções mais sustentáveis frente ao elevado volume de resíduos gerados em obras de infraestrutura. No Brasil, as recentes obras de ampliação e manutenção da malha rodoviária conduzidas por concessionárias têm resultado na geração expressiva de Fresado de Pavimento Asfáltico (RAP). Embora parte desse material seja reincorporada em novas misturas asfálticas, uma parcela significativa ainda não é integralmente reaproveitada, demandando alternativas tecnicamente viáveis para sua utilização na construção civil.

Estudos recentes têm investigado o emprego do RAP em aplicações geotécnicas, incluindo sua interação com geossintéticos (Rathje et al., 2006; Soleimanbeigi et al. 2022; Arulrajah et al., 2013; Liu et al., 2023). No entanto, ainda são limitadas as investigações que avaliam o comportamento ao arrancamento de geogrelhas quando embutidas em RAP, especialmente no que se refere à determinação de parâmetros de resistência de interface sob diferentes níveis de tensão normal.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar o comportamento ao arrancamento de uma geogrelha de polietileno de alta densidade (PEAD) embutida em areia natural e em RAP, por meio de ensaios de arrancamento em caixa de grande escala. A investigação busca comparar a evolução da resistência ao arrancamento em função do deslocamento axial, bem como os parâmetros de resistência de interface obtidos, contribuindo para viabilizar o uso do RAP como material de preenchimento em estruturas de solo reforçado.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

Os materiais avaliados compreenderam uma geogrelha biaxial de polietileno de alta densidade (PEAD) e dois materiais de preenchimento: areia natural e RAP. A geogrelha de PEAD é um produto comercial disponível internacionalmente, com resistência nominal de 68,4 kN/m, espessura das nervuras de 3 mm e aberturas de 35 mm em ambas as direções.

A areia natural (Figura 1a), de origem quartzosa e caráter comercial, foi utilizada como material de referência e previamente caracterizada (granulometria, limites de consistência e umidade ótima). O RAP (Figura 1b) foi proveniente de fresagem de pavimento asfáltico, fornecido por concessionária rodoviária, e utilizado sem processamento adicional. O teor de ligante asfáltico do RAP é de, aproximadamente, 8% (informação do fornecedor). Os resultados da caracterização dos materiais (granulometria, compactação Proctor normal e cisalhamento direto) estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 2. Propriedades da areia natural e do RAP.

| Propriedade | Areia | RAP |
|---|---|---|
| $D_{10}$ | 0.15 | 0.18 |
| $D_{30}$ | 0.42 | 0.50 |
| $D_{60}$ | 0.90 | 1.00 |
| Classificação (SUCS) | SP | SP |
| Coeficiente de uniformidade ($c_u$) | 6.00 | 5.56 |
| Coeficiente de curvatura ($c_c$) | 1.31 | 1.39 |
| Densidade das partículas (g/cm³) | 2.64 | 2.57 |
| Índice de vazios | | |
| Máximo ($e_{max}$) | 0.64 | 0.93 |
| Mínimo ($e_{min}$) | 0.42 | 0.63 |
| Teor de umidade ótimo (%) | 6.90 | 7.20 |
| Ângulo de atrito (°) | 30 | 28 |
| Coesão (kPa) | 0 | 32 |



Figura 1. Caracterização granulométrica da (a) areia natural e do (b) RAP.

## 2.2 Métodos

### *2.2.1 Equipamento de arrancamento*

Os ensaios de arrancamento foram realizados em caixa de grande escala, com dimensões de 0,86 m × 0,55 m × 0,41 m, conforme os procedimentos da ASTM D6706 (2013). O equipamento permite a aplicação de tensão normal controlada sobre o material de preenchimento e o arrancamento da geogrelha a taxa constante de deslocamento. A tensão normal foi aplicada por sistema pneumático com bolsa de ar, garantindo distribuição uniforme da carga vertical, sendo o nível estabelecido aplicado antes do início do ensaio e mantido constante durante todo o teste. O sistema de fixação da geogrelha consiste em garra cilíndrica oca, com 6 cm de diâmetro e 32 cm de comprimento, equipada com revestimento interno antiderrapante e três parafusos superiores para assegurar o aperto e a transferência adequada da força de arrancamento.

### *2.2.2 Preparação do corpo de prova*

Os corpos de prova da geogrelha ensaiados apresentaram dimensões embutidas de 200 mm de largura por 400 mm de comprimento. A geogrelha foi posicionada horizontalmente no interior da caixa, sendo o arrancamento realizado na direção longitudinal (direção de fabricação). O preenchimento da caixa de arrancamento foi realizado por meio de procedimento de compactação em camadas sucessivas, totalizando nove camadas, cada uma com espessura aproximada de 40 mm. A compactação foi executada manualmente com soquete, adotando-se o mesmo procedimento para todos os ensaios, a fim de garantir a uniformidade e a reprodutibilidade dos corpos de prova.

Os materiais de preenchimento foram ensaiados sob condição de umidade controlada, com teor de umidade próximo à umidade ótima de cada material, conforme determinado nos ensaios de compactação Proctor (energia normal). O controle de densidade foi realizado por consistência operacional, mediante a aplicação do mesmo esforço de compactação, número de golpes e procedimento de moldagem para todos os corpos de prova. Essa abordagem assegurou condições comparáveis entre os ensaios conduzidos com areia natural e RAP.

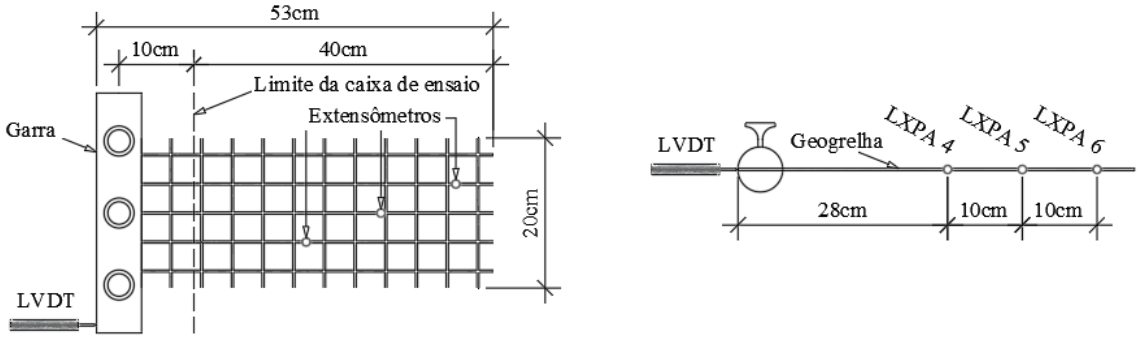
### *2.2.3 Procedimento de ensaio*

Os ensaios foram conduzidos em conformidade com os princípios gerais e recomendações da ASTM D6706, assegurando consistência com os procedimentos laboratoriais padronizados para avaliação da interação solo–geossintético sob carregamento monotônico. A geogrelha foi tracionada a uma taxa constante de deslocamento de 10 mm/min, aplicada por meio de sistema de carregamento motorizado. Foi executado um único ensaio de arrancamento para cada combinação de material de preenchimento e nível de tensão normal

(25, 50 e 100 kPa). Cada ensaio foi conduzido até que fosse atingido o deslocamento máximo de arrancamento de 15 mm, medido pelo Transdutor Linear Variável de Deslocamento (LVDT) externo (maiores detalhes sobre a instrumentação empregada são apresentados na Seção 2.2.4).

### *2.2.4 Instrumentação e aquisição de dados*

A força de arrancamento foi medida por meio de célula de carga instalada em linha com o sistema de tração. O deslocamento axial da geogrelha foi monitorado por um LVDT posicionado externamente, em contato direto com o sistema de fixação utilizado para prender o corpo de prova da geogrelha (Figura 2). Para avaliar o alongamento ao longo do comprimento confinado da geogrelha, três extensômetros do tipo tell-tale foram fixados ao longo de seu comprimento, nas posições indicadas na Figura 2. O espaçamento entre os pontos de medição de deslocamento é apresentado esquematicamente na Figura 2b. Esse arranjo de instrumentação permitiu a avaliação da distribuição de deformações ao longo da geogrelha durante o processo de arrancamento.




(a) (b)

Figura 2. Dimensões e arranjo dos extensômetros ao longo dos corpos de prova de geogrelha ensaiados: (a) vista superior; (b) vista lateral esquemática.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 Desenvolvimento da resistência ao arrancamento em função do deslocamento axial

A Figura 3 apresenta a resistência ao arrancamento em função do deslocamento axial para a geogrelha de PEAD embutida em areia natural e em RAP, sob tensões normais de 25, 50 e 100 kPa, com deslocamentos externos (LVDT) e internos (LXPA). Em ambos os materiais, a resistência aumentou com a tensão normal, conforme esperado para interfaces solo–geogrelha. Contudo, a resposta foi distinta: o RAP mobilizou resistências superiores às da areia, associadas ao efeito de ligação do ligante asfáltico residual.

Na areia, o aumento de 25 para 50 kPa elevou a resistência ao arrancamento em ~74%, enquanto no RAP o incremento foi de ~11%. De 50 para 100 kPa, os aumentos foram de ~98% (areia) e ~13% (RAP), evidenciando maior dependência da areia em relação ao confinamento e menor sensibilidade do RAP à tensão normal, devido ao papel predominante da adesão na interface.

O deslocamento axial para mobilizar a resistência última também depende do material. Na areia, a resistência estabilizou em deslocamentos reduzidos (≈ 2–4 mm; Figuras. 3a, 3c e 3e). No RAP, a mobilização ocorreu em deslocamentos maiores (geralmente > 4 mm e, com frequência, > 6 mm; Figuras. 3b, 3d e 3f), indicando maior deformação da geogrelha durante o arrancamento. Esses níveis distintos de deslocamento sugerem mecanismos dominantes diferentes: comportamento predominantemente de atrito na areia e contribuição adicional no RAP (intertravamento nas aberturas e efeitos de ligação associados ao ligante residual).

A partir da Figura 3 e do arranjo dos extensômetros (Figura 2b), observa-se mobilização progressiva da resistência ao longo do reforço: o LXPA 4 (próximo à garra) requer maiores deslocamentos, enquanto LXPA

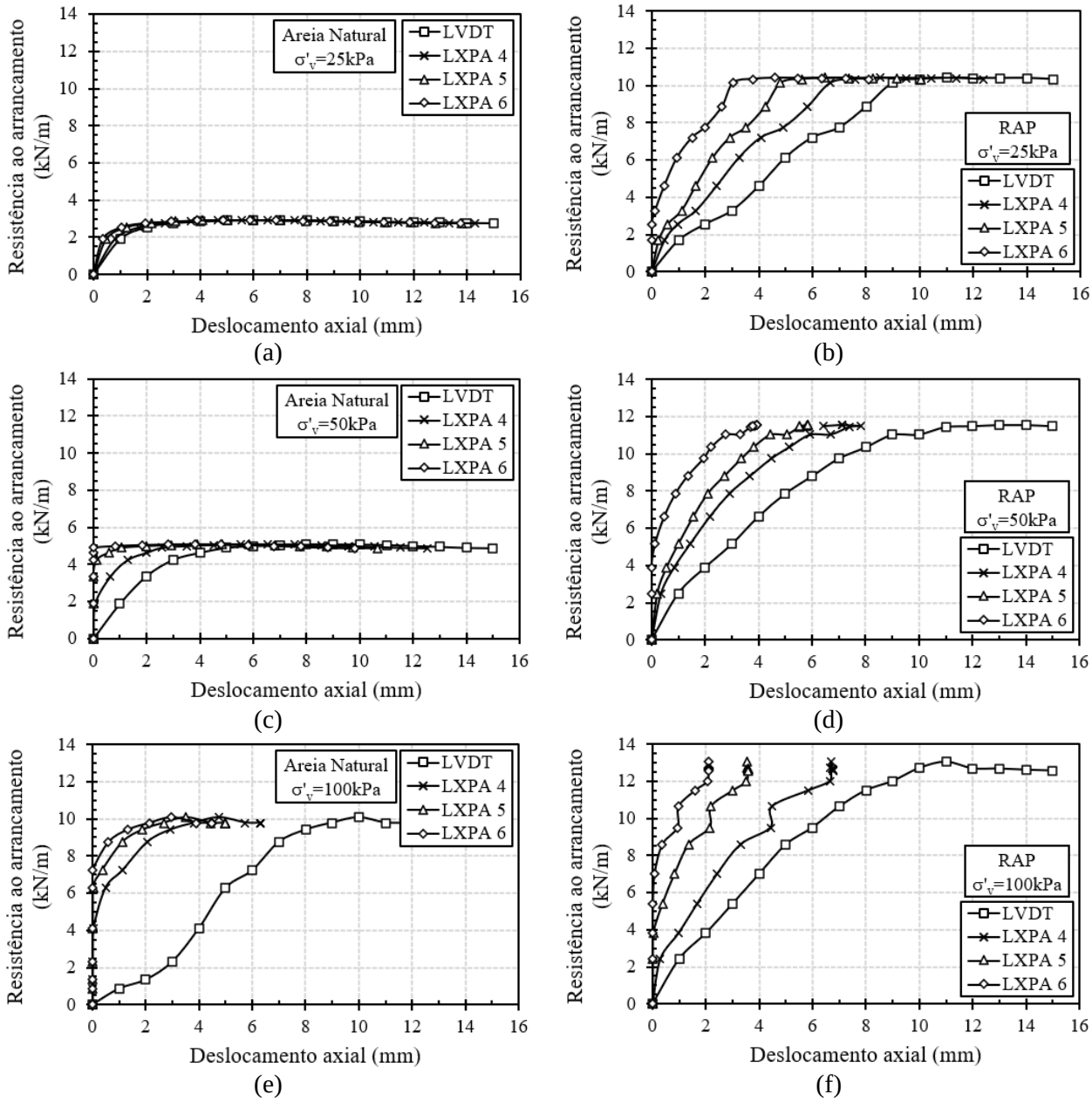



Figura 3. Resistência ao arrancamento em função do deslocamento axial obtida a partir de medições externas (LVDT) e internas (LXPA) para ensaios realizados com areia (a, c e e) e RAP (b, d e f) sob tensões normais de 25, 50 e 100 kPa.

5 e LXPA 6 mobilizam resistência com deslocamentos progressivamente menores, refletindo distribuição não uniforme de deformações e transferência gradual de carga da extremidade carregada para a extremidade livre.

### 3.2 Desenvolvimento das deformações na geogrelha durante o arrancamento

A Figura 4 apresenta o deslocamento axial e a distribuição de deformações internas ao longo da geogrelha de PEAD em dois níveis de mobilização (50% da resistência última e na resistência última), para ensaios com areia natural e RAP sob tensões normais de 25, 50 e 100 kPa. Em todas as condições, o deslocamento axial diminui ao longo do comprimento confinado, indicando transferência progressiva de carga da extremidade tracionada para a extremidade livre do reforço.

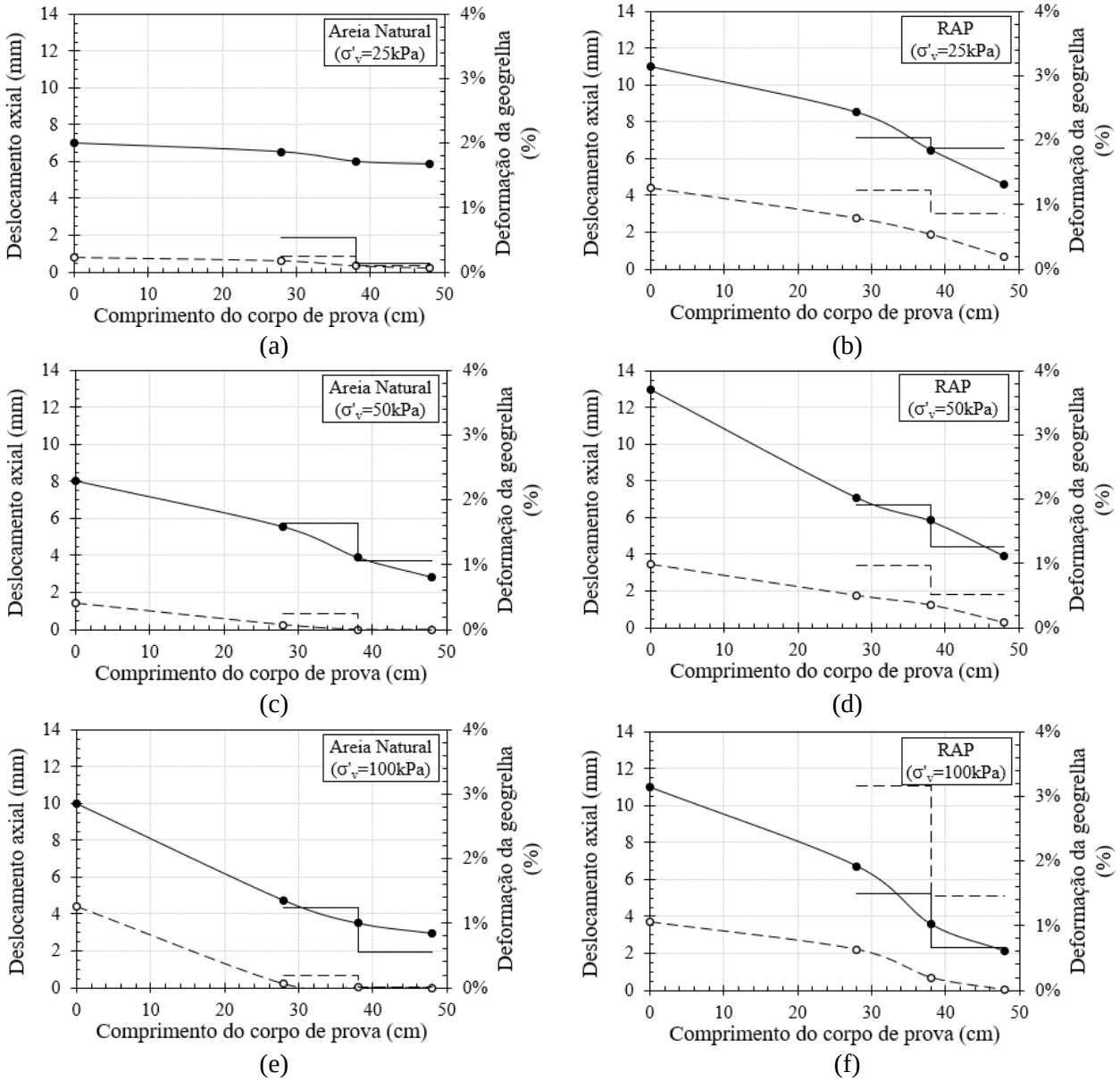



Figura 4. Deslocamento axial e deformação da geogrelha ao longo do comprimento dos corpos de prova ensaiados com areia (a, c e e) e RAP (b, d e f) sob tensões normais de 25, 50 e 100 kPa.

As deformações internas foram obtidas pelos extensômetros entre LXPA 4–LXPA 5 e LXPA 5–LXPA 6, desconsiderando-se o trecho entre a garra e o LXPA 4 por não estar totalmente confinado pelo material de preenchimento. Em todos os ensaios, as maiores deformações concentraram-se próximo ao carregamento (LXPA 4–LXPA 5), enquanto valores menores foram observados no trecho mais distante (LXPA 5–LXPA 6), evidenciando mobilização inicial da interação junto à garra.

Comparativamente, a interface areia–geogrelha mobilizou menores deformações (0%–1,6%), compatíveis com menor interação e resposta predominantemente friccional. Já a interface RAP–geogrelha mobilizou deformações maiores (0,6%–3,2%), sobretudo no trecho próximo à garra, indicando interação mais intensa entre o RAP e a geogrelha e explicando as maiores resistências ao arrancamento observadas.

### 3.3 Coeficiente de interação material de preenchimento–geogrelha

Os parâmetros de resistência de interface material de preenchimento–geogrelha foram interpretados pelo critério de Mohr–Coulomb, a partir da relação entre a tensão de arrancamento de pico e a tensão normal

aplicada. Regressões lineares com as tensões de pico permitiram estimar o ângulo de atrito de interface ($\delta$) e o intercepto da envoltória, denominado adesão ($a$). Os resultados (Figura 5) apresentaram elevados coeficientes de determinação ($R^2$), indicando ajuste linear adequado no intervalo de tensões normais investigado.

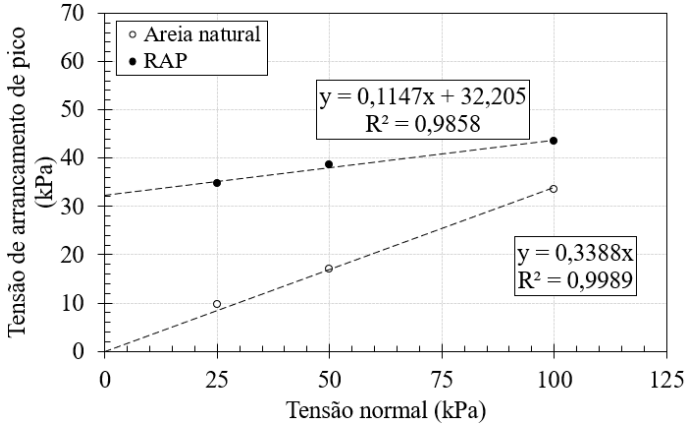



Figura 5. Relação entre a tensão de arrancamento de pico e a tensão normal vertical para geogrelha de PEAD embutida em areia natural e RAP.

Para a areia natural, a resposta foi predominantemente friccional ($\delta \approx 19°$), sem adesão aparente, com clara dependência da resistência ao arrancamento em relação à tensão normal. Para o RAP, observou-se comportamento distinto: o ângulo de atrito de interface foi menor ($\delta \approx 7°$), porém com adesão aparente significativa ($a \approx 32$ kPa), reduzindo a sensibilidade da resistência de pico ao aumento da tensão normal. Esse resultado é coerente com a presença de mecanismos adicionais na interface RAP–geogrelha, em especial intertravamento nas aberturas e efeitos associados ao ligante asfáltico residual; ressalta-se que a adesão aparente não representa coesão verdadeira, mas um parâmetro macroscópico das condições ensaiadas.

Para fins de dimensionamento, a Tabela 3 apresenta os coeficientes de interação calculados por:

$$c_f = \frac{\tan \delta}{\tan \phi} \quad (1)$$

$$c_a = \frac{c}{a} \quad (2)$$

$$c_i = c_f + c_a \quad (3)$$

em que: $c_f$ é o coeficiente de interface atritivo; $\delta$ é o ângulo de atrito de interface, $\phi$, o ângulo de atrito do solo; $c_a$, o coeficiente de interface de adesão; $c$, a coesão do solo; $a$, a adesão aparente de interface; e $c_i$, o coeficiente de interface.

Tabela 3. Coeficientes de atrito, adesão e interação com base nos resultados apresentados.

| Coeficiente | Areia Natural | RAP |
|---|---|---|
| $c_f$ | 0,59 | 0,22 |
| $c_a$ | 0,00 | 0,99 |
| $c_i$ | 0,59 | 1,21 |

O valor de $c_i$ obtido para a areia é compatível com a literatura. Para o RAP, os valores indicam condição não convencional, associada: i) ao ligante residual do RAP, ii) ao contato efetivo entre partículas e aberturas da geogrelha e iii) à contribuição passiva das fibras transversais da geogrelha. Do ponto de vista prático, o RAP pode apresentar condições favoráveis de interação em estruturas de solo reforçado; entretanto, recomenda-se adotar hipóteses conservadoras quanto à mobilização da adesão aparente.

## 4 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou o comportamento ao arrancamento de uma geogrelha de polietileno de alta densidade (PEAD) confinada por areia natural e por RAP, visando analisar a viabilidade do RAP como material de preenchimento em estruturas de solo reforçado. Ensaios de arrancamento em caixa de grande escala foram executados sob tensões normais de 25, 50 e 100 kPa, com monitoramento da resistência mobilizada, do deslocamento axial e das deformações internas ao longo da geogrelha.

Os resultados indicaram que a interface RAP–geogrelha mobilizou resistências ao arrancamento superiores às obtidas com areia nas mesmas tensões normais. Esse desempenho é atribuído ao ligante asfáltico residual, que favorece o intertravamento e mecanismos de adesão na interface. Em termos de interação, a areia apresentou maior contribuição de atrito ($c_f$ = 0,59), enquanto o RAP evidenciou predominância do componente adesivo ($c_a$ = 0,99), controlando a resposta de interface. Do ponto de vista geotécnico, o RAP mostra potencial como preenchimento em solos reforçados, reduzindo o consumo de agregados naturais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arulrajah R, Shear I. Interface Shear Strength Testing of Geogrid-Reinforced Construction and Demolition Materials. 2013; 2: 189–200.

Ashmawy G, Bourdeau AK. Geosynthetic-Reinforced Soils Under Repeated Loading: A Review and Comparative Design Study. 1995.

ASTM (American Society for Testing and Materials). ASTM D 6706-01: Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil. 2013; 8 p.

Ferreira FB, Topa Gomes A, Vieira CS, et al. Reliability analysis of geosynthetic-reinforced steep slopes. Geosynth Int 2016; 23: 301–315.

Ferreira FB, Vieira CS, Lopes ML. Direct shear behaviour of residual soil–geosynthetic interfaces – influence of soil moisture content, soil density and geosynthetic type. Geosynth Int 2015; 22: 257–272.

Hatami K, Esmaili D. Unsaturated soil-woven geotextile interface strength properties from small-scale pullout and interface tests. Geosynth Int 2015; 22: 161–172.

Indraratna B, Ferreira FB, Qi Y, et al. Application of geoinclusions for sustainable rail infrastructure under increased axle loads and higher speeds. Innovative Infrastructure Solutions; 3. Epub ahead of print 1 December 2018.

Lee KZZ, Wu JTH. A synthesis of case histories on GRS bridge-supporting structures with flexible facing. Geotextiles and Geomembranes 2004; 22: 181–204.

Liu L, Zhang Z, Zhang L, et al. Effect of Temperature on Interface Characteristics between Compacted Recycled Asphalt Pavement and Geogrid. Advances in Civil Engineering 2023; 2023: 1–10.

Lopes ML, Ferreira F, Carneiro JR, et al. Soil - Geosynthetic inclined plane shear behavior: Influence of soil moisture content and geosynthetic type. International Journal of Geotechnical Engineering 2014; 8: 335–342.

Mendes MJA, Palmeira EM, Matheus E. Some factors affecting the in-soil load - Strain behaviour of virgin and damaged nonwoven geotextiles. Geosynth Int 2007; 14: 39–50.

Palmeira EM. Bearing force mobilisation in pull-out tests on geogrids. Geotextiles and Geomembranes 2004; 22: 481–509.

Rathje EM, Rauch AF, Trejo D, et al. Evaluation of Crushed Concrete and Recycled Asphalt Pavement as Backfill for Mechanically Stabilized Earth Walls. Austin, Texas, 2006.

Ravi K, Dash SK, Vogt S, et al. Behaviour of Geosynthetic Reinforced Unpaved Roads Under Cyclic Loading. Indian Geotechnical Journal 2014; 44: 77–85.

Soleimanbeigi A, Ozocak A, Li B, et al. Mechanical and hydraulic compatibility of RAP with geosynthetics used in MSE walls. Geosynth Int 2022; 29: 1–18.

Wu JTH, Siel BD, Chou NNS, et al. The Effectiveness of Geosynthetic Reinforced Embankments Constructed over Weak Foundations. 1992.

*XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*
*XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens*
*24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF*
**DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/28**

# Comportamento Geomecânico a Longo Prazo de Lastro Reforçado com Geogrelha sob Carregamento Cíclico

Lucas Machado de Souza
Doutorando, UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil, lmchsouza@hotmail.com

Paulo César de Almeida Maia
Professor, UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil, maia@uenf.br

Maria Cecília Martins Gomes Rangel
Graduanda, UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil, mariaceciliamartins05@gmail.com

RESUMO: O desgaste das partículas de lastro é um problema das ferrovias que gera custos de manutenção que comprometem a competitividade a longo prazo, especialmente devido ao custo de paralisação dos trens. Nesse contexto, novas técnicas vêm sendo avaliadas para aumentar a durabilidade das partículas e reduzir o impacto financeiro das intervenções na via. Este estudo tem como objetivo investigar o comportamento geomecânico a longo prazo de um lastro reforçado com geogrelha, considerando o impacto do reforço na deformabilidade dos grãos e no enrijecimento dos agregados por meio de ensaios triaxiais de carga repetida. Para isolar os efeitos do geossintético, foram produzidas partículas cúbicas de alta resistência com fator de escala igual a 3,5. As geogrelhas em escala reduzida foram confeccionadas por impressão 3D, utilizando os polímeros PETG e PLA, para reproduzir as propriedades mecânicas das geogrelhas PET40 e PET65, respectivamente. Com base nos resultados, observa-se que materiais granulares tendem a estabilizar as deformações ao longo do tempo, mesmo na ausência de reforço. O PLA apresentou desempenho superior ao PETG devido à maior rigidez do polímero, promovendo um enrijecimento dos grãos para todos as leituras. Contudo, os elevados níveis de confinamento podem ter reduzido os efeitos promovidos pelas geogrelhas.

PALAVRAS-CHAVE: Deformação Plástica, Partícula Cúbica, Rigidez da Geogrelha, Reforço com Geossintéticos, Triaxial cíclico.

ABSTRACT: The wear of ballast particles is an issue in railways which leads to maintenance costs that compromise long-term competitiveness, especially due to the expenses associated with train downtime. In this context, new techniques have been evaluated to increase the durability of particles and to mitigate the financial impact of track interventions. This study aims to investigate the long-term geomechanical behavior of geogrid-reinforced ballast, considering the influence of reinforcement on grain deformability and aggregate stiffening through repeated load triaxial tests. To isolate the effect of the geosynthetic, high-strength cubic particles were manufactured with a scaling factor of 3.5. Scaled geogrids were produced by 3D printing using PETG and PLA polymers, to reproduce the mechanical properties of the commercial geogrids PET40 and PET65, respectively. Based on the results, it was observed that granular materials tend to stabilize deformations over time, even in the absence of reinforcement. The PLA exhibited superior performance compared to PETG due to the higher stiffness of the polymer, promoting aggregate stiffening under all readings. However, the high confinement levels may have reduced the effects provided by the geogrids.

KEYWORDS: Plastic deformation, Cubic Particle, Geogrid Stiffness, Geosynthetics Reinforcement, Cyclic Triaxial.

## 1 INTRODUÇÃO

Nas ferrovias, os carregamentos dinâmicos atuantes na via permamente provocam o desgaste progressivo das partículas de lastro, gerando materiais finos que preenchem os vazios entre os agregados e comprometem o desempenho da subestrutura ferroviária a longo prazo (Sun et al., 2016). Por consequência, o

lastro passa por um processo de contaminação, exigindo intervenções periódicas realizadas a partir de técnicas de manutenção, tais como socaria, desguarnecimento e estabilização.

Tendo em vista que o custo de paralisação dos trens pode representar mais de 70% dos custos totais de manutenção das ferrovias (Sgavioli et al., 2015), a busca por métodos e técnicas mais eficientes a longo prazo tem sido objeto de estudo por diversos pesquisadores mundialmente. No Brasil, o governo federal propôs, em 2021, o novo PNL (Plano Nacional de Logística 2035), com o objetivo de aumentar o percentual de participação das ferrovias em até 30% na matriz de transporte e promover um crescimento da malha acima de 60% nos próximos anos. Logo, o entendimento do complexo comportamento geomecânico de materiais granulares sob carregamento cíclico e dinâmico, especialmente a longo prazo, é fundamental para buscar soluções mais eficientes e reestabelecer a competitividade do modal ferroviário em relação a outros meios de transporte.

Entre as técnicas alternativas aos procedimentos convecionais, destaca-se o uso de geogrelhas como elemento de reforço na camada de lastro. As geogrelhas são geossintéticos compostos por filamentos entrelaçados, formando uma malha com alta resistência à tração. A ideia do reforço consiste em reduzir o fluxo lateral das partículas durante os carregamentos do material rodante, aumentando assim o confinamento entre os agregados. Esse processo ocorre por meio do mecanismo de imbricamento devido à elevada flexibilidade de interação da geogrelha com as partículas de lastro (Shukla et al., 2009; Tutumluer et al., 2009; Sweta e Hussaini, 2020; Desbrousses et al., 2023).

Brown et al. (2007) explicam que a abertura da malha, a largura dos filamentos e o módulo de rigidez secante são os parâmetros da geogrelha que mais influenciam na deformabilidade do lastro. Em relação aos benefícios da inclusão de geogrelha na camada de lastro, Abu-Farsakh et al. (2012) e Chen et al. (2013) notaram uma redução nos incrementos de deformação plástica. Indraratna et al. (2013) observaram uma diminuição na deformabilidade e no nível de desgaste do lastro. Além disso, Conceição et al. (2022) também conseguiram melhorar o confinamento dos grãos em comparação ao ensaio realizado sem reforço.

De acordo com Lekarp et al. (2000) e Suiker et al. (2005), quando submetido ao carregamento cíclico, o comportamento geomecânico da camada de lastro é elastoplástico, com deformações elásticas e plásticas nos agregados a cada ciclo de carga. Na bibliografia, existem vários conceitos utilizados para avaliar o comportamento geomecânico a longo prazo, com destaque especial para a teoria de shakedown, em que a deformabilidade de materiais não coesivos pode ser estável ou instável conforme o nível de tensões aplicado (Lees e Tutumluer, 2025). Nesse sentido, Werkmeister et al. (2001) explicam que o comportamento dos grãos é dividido em três limites: shakedown elástico, quando ocorre estabilização das deformações plásticas após o período de acomodação dos grãos (condição favorável), shakedown plástico, quando não ocorre estabilização das deformações e o comportamento dos materiais granulares se mantém elastoplástico, e ruptura, quando o material alcança a condição crítica (condição desfavorável).

Apesar dos inúmeros estudos recentes associados à investigação do comportamento geomecânico de materiais granulares, a reprodução em laboratório do carregamento cíclico e dinâmico aplicado pelo material rodante é complexa, sendo comumente realizada a partir de ensaios triaxiais de carga repetida ou *Repeated Load Triaxial Test* (RLTT). Nesse ensaio, pode-se simular os pulsos de carga aplicados sobre a via permanente, submetendo o corpo de prova a um par de tensões confinante e desviadora, ainda que o estudo seja limitado pelo estado de tensões axissimétrico (tensões principais intermediária e menor idênticas). A carga axial é produzida por uma onda em formato senoidal, composta por um período de carregamento seguido por um período de repouso. Tal carga atua conjuntamente com a tensão de confinamento, fornecida por ar comprimido, produzindo a tensão desviadora que simula a carga aplicada pelo material rodante sobre as partículas.

Existem inúmeros fatores que influenciam a complexa interação entre a camada de lastro e a geogrelha, incluindo aspectos intrínsecos, como forma, tamanho e resistência das partículas, e extrínsecos, como o estado de tensões, a trajetória de tensões, bem como as condições de contorno (Indraratna et al., 2013; Sun et al., 2016; Delgado et al., 2019). Portanto, a avaliação laboratorial requer o isolamento das variáveis de interesse para eliminar efeitos de segunda ordem, tornando os resultados mais representativos. Nesse contexto, o trabalho tem como objetivo analisar o comportamento geomecânico de um lastro reforçado com geogrelha, avaliando a influência da rigidez da geogrelha sobre o confinamento dos agregados e na deformabilidade a longo prazo. Para isso, foram utilizadas partículas cimentícias de forma controlada (cúbicas) em ensaios de longa duração (Deformação Permanente – DP), permitindo isolar os efeitos promovidos pela geogrelha em comparação ao lastro sem adição de reforço.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Produção e caracterização das partículas cimentícias

Inicialmente, foi feita a moldagem as partículas conforme a dosagem de 130 MPa proposta por Conceição et al. (2022) (Tabela 1). Esse material é classificado com um concreto de ultra alto desempenho (CUAD), possuindo uma matriz densa composta por agregados finos que lhe confere excelente resistência, além de permitir o controle de forma dos agregados, que foram todos produzidos na forma cúbica por apresentar o menor nível de desgaste.

Tabela 1 – Dosagem do concreto para 1 m³ (Conceição et al. 2022).

| Material | Massa (kg) | Densidade (g/cm³) |
|---|---|---|
| Cimento | 1013,00 | 3,10 |
| Cinza da casca do arroz | 53,82 | 2,09 |
| Pó de quartzo (Sílica #325) | 81,26 | 2,65 |
| Areia (150 µm) | 61,00 | 2,65 |
| Areia (425 µm) | 832,00 | 2,65 |
| Microfibra de volastonita | 76,70 | 2,90 |
| Superplastificante | 51,13 | 1,21 |
| Água | 196,10 | 1,00 |

Como apresentado na Figura 1, a produção das partículas foi feita conduzida em três etapas: mistura, cura e polimento. Na primeira etapa, a mistura foi preparada por meio de uma haste presa a uma furadeira de coluna até atingir uma boa trabalhabilidade do concreto. Posteriormente, a mistura foi transferida para moldes de silicone, produzidos a partir do preenchimento de fôrmas confeccionadas com impressão 3D, e desmoldada após 48 horas, permanecendo no processo de cura em água saturada de cal durante 28 dias. Após a cura, as partículas permaneceram no Micro-Deval durante 20 minutos para polimento e arredondamento das arestas, visando reduzir o desgaste dos grãos durante a realização dos ensaios.

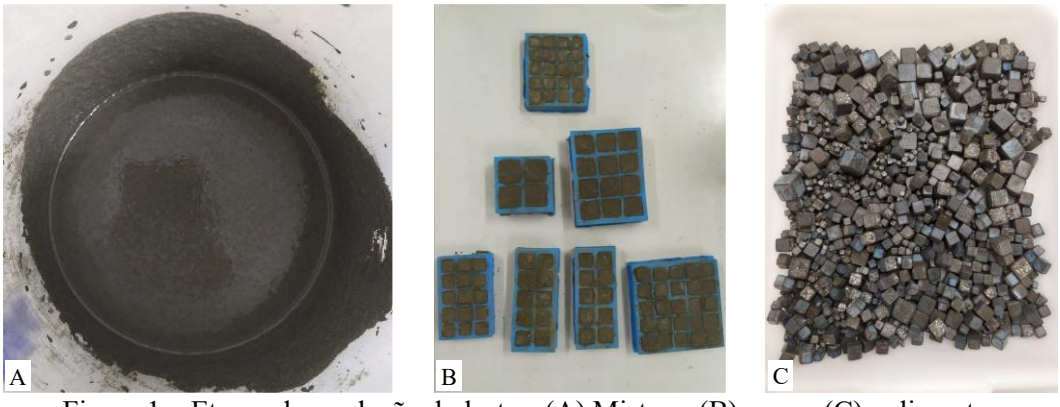



Figura 1 – Etapas de produção do lastro: (A) Mistura, (B) cura e (C) polimento.

A graduação n.º 24 (AREMA, 2015) foi adotada como referência para a definição dos limites inferior (LI) e superior (LS) da curva granulométrica (Figura 2), por ser amplamente utilizada em estudos realizados em ferrovias do tipo *heavy haul*, linhas destinadas ao transporte de grandes cargas como carvão e minério de ferro. Essa graduação foi selecionada por proporcionar um bom grau de imbricamento entre os grãos (Delgado et al., 2019). Adicionalmente, conforme as recomendações de Indraratna et al. (2006), a curva granulométrica (Figura 1) foi redistribuída para que o coeficiente de uniformidade permanecesse próximo a 2,0, reduzindo o grau de fragmentação das partículas.

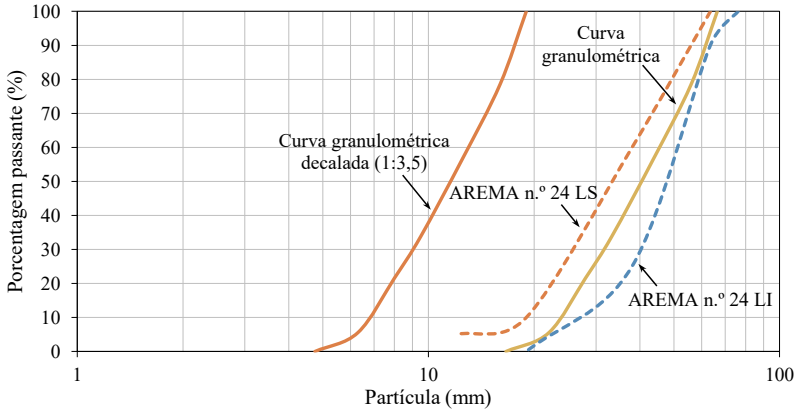



Figura 2 – Curva granulométrica do lastro.

As partículas cimentícias, com tamanhos entre 19,0 mm e 4,76 mm (Figura 3), apresentam forma cúbica para destacar o efeito promovido pelas geogrelhas. Para efeito de comparação, foram utilizadas partículas de gnaisse, extraídas do município vizinho de Itaperuna, como referência para o lastro natural.



Figura 3 – Partículas de lastro (19,0 mm a 4,76 mm).

Seis agregados de 19,0 mm foram produzidos para os ensaios de caracterização física (absorção, massa específica e porosidade aparente). Além disso, também foram produzidas partículas de 50,0 mm para o ensaio de resistência à compressão uniaxial na prensa universal e partículas com tamanhos entre 6,2 mm e 12,0 mm para o ensaio de resistência à abrasão no Micro-Deval.

## 2.2 Confecção e caracterização das geogrelhas modelo

Observa-se na Figura 4A que as geogrelhas biaxiais Basetrac Grid PET40, com resistência à tração nominal de 40 kN/m, e PET65, com resistência à tração nominal de 65 kN/m, foram utilizadas como referência (protótipo) para a confeccção das geogrelhas em escala reduzida (modelo) por serem amplamente empregadas como elemento de reforço em pavimentos. Fabricadas a partir de filamentos de polietileno tereftalato (PET), tais geogrelhas possuem abertura de malha de 25,0 mm, largura de filamento de 6,0 mm e espessura de 1,0 mm. Tendo como base a caracterização das geogrelhas protótipo nos ensaios de tração uniaxial na direção longitudinal, conduzidos a uma taxa de 20 mm/min, foram confeccionadas duas geogrelhas modelo com um fator de escala de 3,5, sendo uma flexível (simulando a PET40) e outra mais rígida (simulando a PET65).

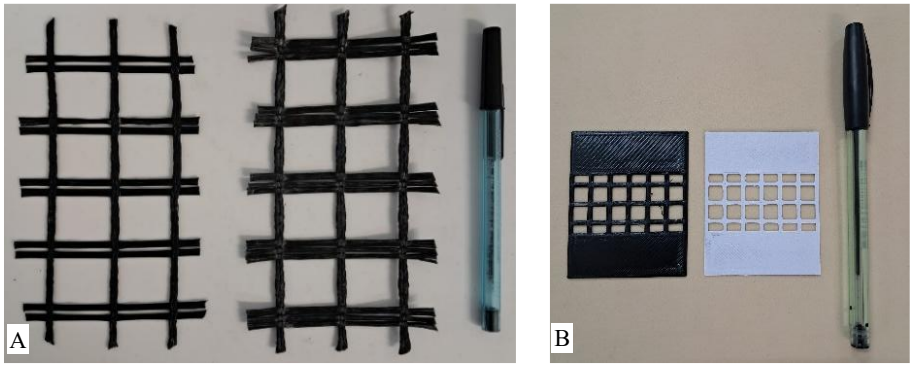



Figura 4 – Geogrelhas: (A) PET40 (à esquerda) e PET65 (à direita) e (B) PETG e PLA.

Desenvolvidas no software *SketchUp*, as geogrelhas modelo apresentam 7,0 mm de abertura da malha, 1,7 mm de largura do filamento e 0,3 mm de espessura do filamento. Essas geogrelhas foram confeccionadas com impressão 3D, em substituição ao método convencional de corte de filamentos, considerando os critérios propostos por Viswanadham e König (2004) para modelos 1g. Como apresentado na Figura 4B, o polímero termoplástico PETG (polietileno tereftalato com adição de glicol), na cor preta, foi utilizado na confecção da geogrelha mais flexível (modelo X), enquanto o PLA (ácido polilático), na cor branca, foi empregado para representar a geogrelha mais rígida (modelo Y).

### 2.3 Preparação da amostra e programa de ensaios triaxiais

O corpo de prova, com densidade de 1,0 g/cm³, possui 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura (Figura 5). Além das partículas de lastro, a amostra também é composta por fitas de PVC de baixa resistência circunferencial, membranas de látex e *o-rings* de vedação. O uso das fitas de PVC permite prevenir furos pelo contato da membrana de látex com os agregados durante a preparação da amostra. De acordo com as prescrições da norma EN 13286-7 (CEN, 2004), foram utilizadas membranas com espessura inferior a 0,8% do diâmetro do corpo de prova. Os ensaios conduzidos na membrana de látex, com espessura de 0,4 mm, demonstraram que, para uma tensão de 1,0 kPa, a correção do efeito membrana deve ser igual a 12%.



Figura 5 – Amostra cilíndrica para ensaio triaxial de carga repetida em escala reduzida.

A montagem foi iniciada a partir do encaixe das fitas de PVC no cap inferior e vedação na primeira membrana, com os agregados adicionados e compactados em três camadas de 6,6 cm. Nos ensaios com reforço, a geogrelha foi adicionada após a primeira camada de agregados, tendo em vista que as geogrelhas são posicionadas na via permanente nas camadas inferiores com o objetivo de evitar danos ao geossintético. Na sequência, foi feita a fixação do cap superior e adição da segunda membrana foi adicionada. Posteriormente, um cabeçote de PVC foi fixado no cap superior e os dois transdutores de deslocamento (*Linear Variable Differential Transducers* – LVDTs), responsáveis pelas medições nas deformações axiais, foram calibrados individualmente antes de cada ensaio.

Todo o carregamento foi realizado por um sistema composto por pistão, célula de carga de 5 kN, regulador de pressão, válvula solenoide de três vias e cilindro pneumático. Para aplicar o confinamento à amostra, foi utilizado um compressor de ar comprimido. Conforme as recomendações da norma EN 13286-7 (CEN, 2004), os ensaios DP foram conduzidos pelo método de estágio único (EU), sendo aplicado somente um nível de tensão sobre a amostra (tensão confinante de 70 kPa e tensão desviadora de 280 kPa). Esse nível foi estabelecido a partir das formulações empíricas de Delgado et al. (2019), considerando uma ferrovia *heavy haul* com carga axial de 32,5 toneladas por eixo e velocidade média de operação de 80 km/h. Para tal, foi aplicado um pulso senoidal, a uma frequência de 2 Hz, com 100 ms de carga e 400 ms de repouso.

Utilizando o sistema de aquisição de dados, foi possível monitorar as principais configurações do ensaio, incluindo tensões, leituras dos transdutores, número de ciclos, ciclo atual, além dos tempos de carga e repouso em cada pulso. Contudo, devido às limitações do equipamento, não foi possível registrar o incremento de deformação correspondente a cada ciclo, sendo possível apenas a obtenção dos valores acumulados após o total de ciclos. Sendo assim, as deformações foram lidas a cada 50 mil ciclos até o total de 250 mil ciclos. Posteriormente, as medições foram realizadas nos ciclos de 350 mil, 450 mil, 550 mil, 700 mil e 1 milhão.

# 3 RESULTADOS

## 3.1 Caracterização física e mecânica do lastro

As partículas apresentaram uma resistência à compressão média de 120 MPa, se aproximando da rocha natural. No entanto, os agregados apresentam algumas diferenças nas propriedades físicas e mecânicas em comparação com os agregados de Conceição et al. (2022). Como ilustrado na Tabela 2, a resistência à compressão foi 3,71% inferior enquanto o desgaste por abrasão foi 62,3% superior. É notável que as partículas são mais porosas devido aos efeitos de uma reação adversa causada pelo aditivo superplastificante.

Tabela 2 – Propriedades do lastro.

| Propriedade | Resultado desse estudo | UHPC* | Gnaisse* |
|---|---|---|---|
| Massa específica (kg/m³) | 2330,03 | 2673,98 | 2634,86 |
| Porosidade (%) | 7,30 | 4,60 | 0,40 |
| Teor de absorção de água (%) | 3,10 | 1,90 | 0,20 |
| Desgaste por abrasão (%) | 20,50 | 12,63 | 10,93 |
| Resistência à compressão (MPa) | 119,66 | 132,30 | 124,27 |

* Dados de Conceição et al. (2022)

## 3.2 Caracterização das geogrelhas modelo

Após a realização dos ensaios de tração nas geogrelhas PET40 e PET65, foram definidos os critérios para a confecção das geogrelhas modelo. Dada a textura lisa presentenos polímeros PETG e PLA, foram observados escorregamentos das amostras nas garras de aperto frontal nos primeiros testes, influenciando as medições de deslocamento. Assim, nos próximos ensaios, foram aplicadas lixas de baixa gramatura nas superfícies de contato das garras. Os filamentos dessas geogrelhas também rompiam durante a execução dos ensaios. portanto, a espessura dos filamentos foi aumentada de 0,3 mm para 0,6 mm.

Conforme a Tabela 3, as geogrelhas modelo X (PETG) e modelo Y (PLA) apresentaram rigidez 64,7% e 84,0% superior às geogrelhas PET40 (33,5 kN/m) e PET65 (50,5 kN/m), respectivamente, considerando o fator escala de $1/\lambda^2$ proposto por Viswanadham & König (2004). Por outro lado, deve-se considerar que as resistências das geogrelhas prótotipo foram inferiores aos valores comerciais especificados pelo fabricante.

Tabela 3 – Propriedades das geogrelhas.

| Parâmetro | PET40 | PET65 | PETG | PLA |
|---|---|---|---|---|
| Abertura da malha (mm) | 25,00 | 25,00 | 7,00 | 7,00 |
| Largura dos filamentos (mm) | 6,00 | 6,00 | 1,70 | 1,70 |
| Espessura dos filamentos (mm) | 1,00 | 1,00 | 0,60 | 0,60 |
| Resistência à tração (kN/m) | 29,23 (±0,95) | 40,10 (±1,20) | 2,86 (±0,01) | 4,11 (±0,01) |
| Deformação (%) | 7,12 (±0,43) | 6,47 (±0,23) | 2,37 (±0,03) | 2,02 (±0,09) |
| Rigidez secante (kN/m) | 410,35 (±29,56) | 619,80 (±29,47) | 120,69 (±1,63) | 203,66 (±1,36) |

## 3.3 Ensaios triaxiais de carga repetida

Como relatado por Qian et al. (2018), pode-se observar que os incrementos de deformação plástica foram superiores nos primeiros 350 mil ciclos até atingir uma tendência de estabilização, ainda que a condição de shakedown elástico não tenha sido alcançada. Tendo em vista que os ensaios DP foram realizados apenas

com um único nível de tensão, com interrupções a cada 50 mil ciclos até o total de 250 mil ciclos, é importante destacar que o condicionamento das amostras entre as leituras pode ter influenciado os resultados obtidos.

Em comparação ao ensaio sem reforço (DP-I), a geogrelha PETG apresentou uma redução de até 40,8% nas deformações (DP-II), enquanto a PLA reduziu em até 52,5% (DP-III) (Figura 6), demonstrando que os efeitos promovidos pelas geogrelhas foi positivo.

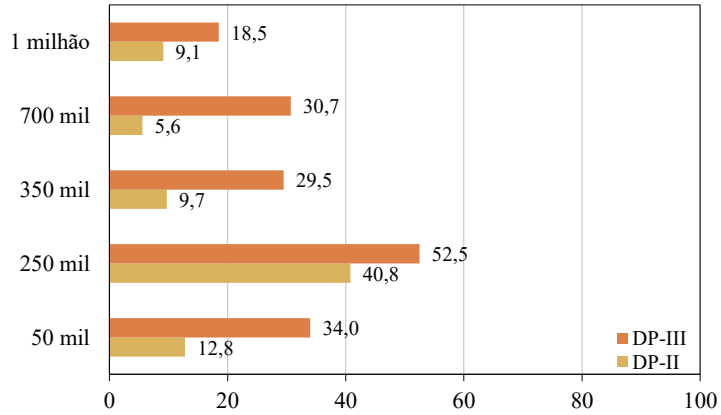



Figura 6 – Percentual de redução dos incrementos de deformação plástica por número de ciclos

A razão entre a abertura da malha (7 mm) e o diâmetro médio dos agregados (11,7 mm) igual a 0,6 corresponde a uma faixa de mobilização fraca em relação ao mecanismo de imbricamento. McDowell et al. (2006) recomendam valores entre 1,1 e 1,4 enquanto Indraratna et al. (2013) sugerem valores entre 0,95 e 1,2. Sendo assim, a abertura da malha pode ter impactado na interação entre o lastro e a geogrelha, evidenciando a influência desse parâmetro na deformabilidade do lastro como observado por Brown et al. (2007). Contudo, vale ressaltar que a elevada rigidez das geogrelhas modelo (Figura 7), aliada ao alto nível de confinamento (70 kPa), pode ter influenciado nos resultados obtidos. Portanto, novos estudos devem ser conduzidos utilizando um confinamento mais baixo para simular com maior fidelidade as condições do lastro na via. Além disso, recomenda-se também o uso de geogrelhas mais flexíveis e com uma faixa de mobilização superior.

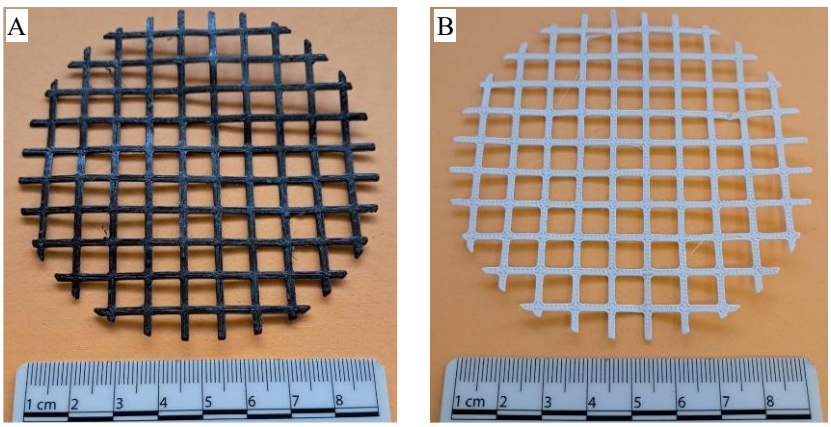



Figura 7 – Condição das geogrelhas após os ensaios de longa duração: (A) PETG e (B) PLA

## 4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que os benefícios promovidos pelas geogrelhas foram mais evidentes nos primeiros ciclos de carga devido ao período de reacomodação dos grãos. Entretanto, os efeitos da interação lastro-geogrelha podem ter sido reduzidos pelos altos níveis de confinamento.

Em comparação com o PETG, o polímero PLA promoveu um maior enrijecimento do lastro em todas as leituras. Contudo, a elevada rigidez e a textura lisa das geogrelhas modelo inibiram o grau de adaptabilidade com os agregados, enquanto a abertura da malha influenciou a mobilização do efeito de imbricamento, resultando em uma flexibilidade de interação parcial com os grãos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPERJ, pelo apoio financeiro, a HUESKER, pelo fornecimento das geogrelhas Basetrac Grid, a BLITZAR, pela confecção das geogrelhas modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AREMA (2015). Manual for Railway Engineering: Vol. I – IV. American Railway Engineering and Maintenance of Way Association, Lanham, United States.

Brown, S. F.; Kwan, J.; Thom, N. H. (2007) Identifying the key parameters that influence geogrid reinforcement of railway ballast. *Geotextiles and Geomembranes*, 25 (6), p. 326-335.

Conceição, K. S.; Maia, P. C. A.; Cordeiro, G. C. (2022) Use of ultra-high-performance concrete to produce standard coarse aggregates. *Journal of Testing and Evaluation*, 50 (2), p. 1224-1235.

CEN (2004). EN 13286-7: *Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures*. Brussels, Belgium.

Delgado, B. G.; Fonseca, A. V.; Fortunato, E.; Maia, P. (2019) Mechanical behavior of inert steel slag ballast for heavy haul rail track: Laboratory evaluation. *Transportation Geotechnics*, 20.

Desbrousses, R. L. E.; Meguid, M. A.; Bhat, S. (2023) Experimental investigation of the effects of subgrade strength and geogrid location on the cyclic response of geogrid-reinforced ballast. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 9 (67).

Indraratna, B., Ionescu, D., & Christie, H.D. (1998) Shear behavior of railway ballast based on large-scale triaxial tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124 (5), p. 439-449.

Indraratna, B.; Khabbaz, H.; Salim, W.; Christie, D. (2006) Geotechnical properties of ballast and the role of geosynthetics in rail track stabilisation. *Ground improvement*, 10 (3), p. 91-101.

Indraratna, B.; Hussaini, S. K. K.; Vinod, J. S. (2013) The lateral displacement response of geogrid reinforced ballast under cyclic loading. *Geotextiles and Geomembranes*, 39 (3), p. 20-29.

Indraratna, B.; Ngo, N. T.; Rujikiatkamjorn, C.; Vinod, J. S. (2014) Behavior of fresh and fouled railway ballast subjected to direct shear testing: Discrete element simulation. *International Journal of Geomechanics*, 14 (1), p. 34-44.

Lackenby, J.; Indraratna, B.; McDowell, G.; Christie, D. (2007) Effect of confining pressure on ballast degradation and deformation under cyclic triaxial loading. *Géotechnique*, 57 (6), p. 527-536.

McDowell, G. R.; Harireche, O.; Konietzky, H.; Brown, S. F.; Thom, N. H. (2006) Discrete element modelling of geogrid-reinforced aggregates. *Geotechnical Engineering*, 159 (1), p. 35-48.

Qian, Y.; Tutumluer, E.; Mishra, D.; Kazmee, H. (2018) Triaxial testing and discrete element modelling of geogrid-stabilised rail ballast. *Ground Improvement*, 171 (4), p. 223-231.

Sgavioli, F.; Bernucci, L.; Costa, R.; Motta, R.; Moura, E. (2015) Análise do custo do ciclo de vida do lastro ferroviário na estrada de ferro Vitória Minas. *Transportes*, 23 (2), p. 5-12.

Sun, Q. D.; Indraratna, B.; Nimbalkar, S. (2016) Deformation and degradation mechanisms of railway ballast under high frequency cyclic loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142 (1).

Sweta, K.; Hussaini, S. K. K. (2020) Effect of geogrid on deformation response and resilient modulus of railroad ballast under cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 264.

Viswanadham, B.V.S., & König, D. (2004) Studies on scaling and instrumentation of a geogrid. *Geotextiles and Geomembranes*, 22(5), p. 307-328.

Werkmeister, S.; Dawson, A. R.; Wellner, F. (2001) Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept. *Transportation Research Record*, 1757 (1), p. 75-81.

*XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*
*XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens*
*24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF*
**DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/29**

# Comportamento tensão-deformação de geocélulas preenchidas por resíduos da construção e demolição (RCD-R)

Bruna de Carvalho Sebastião
Graduanda, Universidade Presbiteriana Mackenzie, Campinas, Brasil, brunasebastiao03@gmail.com

Juliana Keiko Tsugawa
Professora Doutora, Universidade Presbiteriana Mackenzie, Campinas, Brasil, juliana.tsugawa@mackenzie.br

RESUMO: Geocélulas são estruturas poliméricas tridimensionais utilizadas em obras geotécnicas por suas funções de reforço, confinamento, estabilidade e distribuição de tensões. Usualmente, são preenchidas por materiais granulares convencionais. Em contrapartida, a disposição incorreta dos resíduos da construção e demolição (RCD) pode causar impactos ambientais relevantes, reforçando a importância de buscar alternativas sustentáveis para o seu reaproveitamento. Assim, visando a sustentabilidade em obras geotécnicas, foi estudado o comportamento tensão-deformação de geocélulas preenchidas com RCD reciclados (RCD-R), por meio de ensaios de compressão axial. Foram utilizados agregados reciclados (brita e pedrisco) e solo-brita reciclado (SB-1 e SB-2), e materiais convencionais (brita 1 e pedrisco). As tensões suportadas, considerando o critério de ruptura de 15% de deformação, pela brita e pedrisco convencionais, pedrisco reciclado, brita reciclada, SB-1 e SB-2 foram de aproximadamente 650 kN/m$^2$, 550 kN/m$^2$, 520 kN/m$^2$, 430 kN/m$^2$, 335 kN/m$^2$ e 130 kN/m$^2$, e os valores de rigidez foram de 1,73 kN/mm, 1,42 kN/mm, 1,28 kN/mm, 1,14 kN/mm, 0,82 kN/mm e 0,32 kN/mm, respectivamente. Os resultados indicam que, embora os agregados convencionais tenham apresentado melhor desempenho em termos de resistência e rigidez, a utilização de materiais reciclados mostra-se tecnicamente viável, desde que sejam consideradas as tensões atuantes em cada aplicação geotécnica.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos da construção e demolição; geocélulas; ensaios de compressão axial; comportamento tensão-deformação; agregados.

ABSTRACT: Geocells are three-dimensional polymeric structures used in geotechnical works for reinforcement, confinement, stabilization, and stress distribution. They are usually filled with conventional granular materials. In contrast, the improper disposal of construction and demolition waste (CDW) may cause significant environmental impacts, highlighting the need for sustainable reuse alternatives. Thus, aiming to promote sustainability in geotechnical works, the stress–strain behavior of geocells filled with recycled CDW (RCD-R) was investigated through axial compression tests. Recycled aggregates (coarse crushed stone and stone chips), recycled soil–crushed stone mixtures (SB-1 and SB-2), and conventional materials (coarse crushed stone and stone chips) were used. Considering a failure criterion of 15% strain, the stresses sustained by conventional coarse crushed stone and stone chips, recycled stone chips, recycled coarse crushed stone, SB-1, and SB-2 were approximately 650, 550, 520, 430, 335, and 130 kN/m², respectively, while the corresponding stiffness values were 1.73, 1.42, 1.28, 1.14, 0.82, and 0.32 kN/mm. The results indicate that, although conventional aggregates performed better in terms of strength and stiffness, the use of recycled materials is technically feasible, provided that the stress levels involved in each geotechnical application are properly considered.

KEYWORDS: Construction and demolition waste; geocells; unconfined compression tests; stress-strain behavior; aggregates.

## 1 INTRODUÇÃO

A construção civil desempenha papel fundamental no desenvolvimento urbano, representando aproximadamente 10% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil (ABRECON, 2020). No entanto, esse setor também é responsável por grande parte da geração de resíduos sólidos no país. De acordo com a Associação

Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, em 2021 foram coletadas pelos municípios mais de 48 milhões de toneladas de resíduos da construção e demolição (RCD), o que equivale a cerca de 227 kg por habitante/ano, evidenciando a relevância desse tipo de resíduo no contexto urbano e a necessidade de sua gestão adequada (ABRELPE, 2022). A gestão inadequada desses resíduos acarreta uma degradação ambiental, manifestada pelo assoreamento de cursos d'água, pela contaminação do solo e das águas subterrâneas, pelo entupimento de sistemas de drenagem, além da poluição visual e da proliferação de vetores de doenças. Nesse contexto, destacam-se legislações como a Resolução CONAMA n° 307/2002, a qual estabelece as diretrizes para a gestão dos RCD, e a Lei n° 12.305/2010, que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Tais legislações visam minimizar esses impactos e estimular o gerenciamento adequado (BRASIL, 2002; BRASIL, 2010). Dessa forma, a reciclagem surge como alternativa sustentável para mitigar esses impactos gerados pelo setor da construção civil e diminuir a extração de recursos naturais, contribuindo para a valorização desses resíduos. Porém, para aumentar o consumo dos resíduos da construção e demolição reciclados (RCD-R) são necessárias alternativas tecnicamente seguras e viáveis de reaproveitamento. Uma possibilidade de reaproveitamento consiste na utilização dos RCD-R como material preenchedor de geocélulas em substituição aos agregados naturais para obras de contenção e estabilização do solo.

As geocélulas são estruturas tridimensionais que promovem o confinamento lateral do material de preenchimento (normalmente solos granulares ou agregados naturais), melhorando sua resistência ao cisalhamento e à deformação (AVESANI NETO, 2013; ZHOU; CHEN; ZHU, 2009). Poucos estudos abordam o comportamento mecânico de geocélulas e os trabalhos identificados concentram-se no estudo do desempenho de geocélulas associadas a areias e outros tipos de solos em outras aplicações (BATHURST; KARPURAPU, 1993; ZHOU; CHEN; ZHU, 2009; LEI *et al*., 2024) ou ao estudo do RCD-R (CHEN; HUANG; HUANG, 2010). Avesani Neto (2013) desenvolveu um novo método de previsão da capacidade de carga de solos reforçados com geocélulas, considerando os mecanismos de desenvolvimento da resistência do solo de fundação e da geocélula. Seus resultados indicaram que o modelo se adequou de forma satisfatória para diferentes características da geocélula (geometria e material de constituição), do solo de fundação e de preenchimento (diferentes tipos de areia e argila) e da geometria do carregamento (placas circular, retangular e corrida). Garcia (2021) desenvolveu um equacionamento analítico capaz de modelar o comportamento tensão-deformação das células e seu material de preenchimento, considerando o aumento de confinamento gerado pelas paredes da geocélula, a não linearidade do comportamento do solo, os esforços de compactação do solo, a contribuição da rigidez e da geometria da geocélula e a compatibilidade de deformações, com satisfatória capacidade de previsão dos resultados. Estudos recentes têm demonstrado o potencial dos RCD-R em aplicações geotécnicas devido às suas características de resistência com ângulo de atrito entre 30° e 45° (BORDOLOI; AFOLAYAN; NG, 2022) e estabilidade. De acordo com Santos (2007) e Dutta; Kumar; Singh (2021), que analisaram o RCD-R como preenchedor de muros de solo reforçado com geogrelhas, os materiais reciclados apresentaram resultados satisfatórios e alguns até mesmo superiores, em comparação aos tradicionais, quando avaliadas a capacidade de suporte e deformabilidade. Além dessas propriedades, os ensaios de arrancamento e tração também obtiveram resultados favoráveis para a combinação dos reciclados com os geossintéticos. Apesar dos resultados apresentados por estes autores, a utilização dos RCD-R associados a geossintéticos para aplicações geotécnicas permanece pouco investigada, especialmente no que se refere ao uso de RCD-R como material de preenchimento de geocélulas, configurando uma lacuna relevante na literatura geotécnica.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais convencionais e reciclados

Os materiais utilizados foram os resíduos da construção e demolição reciclados (RCD-R), agregados convencionais para fins comparativos, e geocélulas. Os RCD-R foram obtidos em duas usinas de reciclagem: ECO-X, localizada em Guarulhos-SP (Figura 1a), que forneceu brita 1 reciclada, brita 2 reciclada e pedrisco reciclado; e a Usina Verde de Paulínia-SP (Figura 1b), de onde foi coletado solo-brita de coloração alaranjada, com predomínio de fração areia e presença de argila.