

# Comportamento geomecânico de lastro reforçado com geogrelha em ensaios de longa duração

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:** A degradação do lastro é um problema recorrente das ferrovias, gerando custos de manutenção corretiva que impactam a competitividade a longo prazo. Este trabalho avalia o comportamento geomecânico de um lastro reforçado com geogrelha, analisando o efeito do reforço na deformabilidade e enrijecimento dos agregados por meio de ensaios triaxiais dinâmicos. Para centralizar os efeitos do geossintético, foram produzidas partículas cúbicas de alta resistência com fator escala de 3,5. Geogrelhas em escala reduzida foram confeccionadas com impressão 3D, utilizando os polímeros PETG e PLA para simular as características mecânicas das geogrelhas Basetrac Grid PET40 e PET65, respectivamente. Os resultados mostram que materiais granulares tendem a estabilizar as deformações a longo prazo, mesmo sem adição de reforço. Como esperado, o PLA apresentou desempenho superior ao PETG devido à maior rigidez. No entanto, os níveis de confinamento dos ensaios podem ter atenuado os efeitos promovidos pelas geogrelhas. As partículas também sofreram baixo grau de fragmentação, indicando que o controle da forma da partícula, aliado a granulometrias bem distribuídas, influenciam no desgaste dos agregados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Deformação Plástica, Rigidez da Geogrelha, Reforço com Geossintéticos, Triaxial dinâmico.

**ABSTRACT:** Ballast degradation is a recurring issue in railways, generating corrective maintenance costs that affect long-term competitiveness. This study evaluates the geomechanical behavior of ballast reinforced with geogrid, analyzing the effect of reinforcement on the deformability and stiffening of aggregates through dynamic triaxial tests. To isolate the effects of the geosynthetic, high-strength cubic particles were produced using a scale factor of 3.5. Scaled geogrids were fabricated using 3D printing, employing PETG and PLA polymers to simulate the mechanical properties of Basetrac Grid PET40 and PET65 geogrids, respectively. The results indicate that granular materials tend to exhibit long-term stabilization of deformability, even without reinforcement. As expected, PLA showed superior performance compared to PETG due to its higher stiffness. However, the confinement levels adopted in the tests may have attenuated the effects provided by the geogrids. The particles also exhibited a low degree of fragmentation, suggesting that particle shape control, combined with well-graded grain size distributions, influence aggregate degradation.

**KEYWORDS:** Plastic deformation, Geogrid Stiffness, Geosynthetics Reinforcement, Dynamic Triaxial.

## 1 INTRODUÇÃO

Devido aos carregamentos dinâmicos atuantes na via permanente, as partículas de lastro sofrem um desgaste progressivo, resultando na geração de materiais finos que preenchem os vazios entre os agregados. Como consequência, o lastro passa pelo processo de colmatção que afeta a capacidade funcional a longo prazo (Indraratna et al., 2014; Sun et al., 2016). Para restabelecer as condições plenas de funcionamento da subestrutura ferroviária, são realizadas intervenções corretivas de manutenção, como a socaria, o stoneblowing e o desguarnecimento. Embora sejam eficientes a curto prazo, tais métodos exigem paralisações contínuas da via, aumentando os custos operacionais gradativamente.



2 0 2 5

Considerando que a paralisação dos trens para a realização de intervenções corretivas na via permanente pode representar mais de 70% dos custos totais de manutenção (Sgavioli et al., 2015), o governo brasileiro propôs, em 2021, o novo plano nacional de logística (PNL 2035). Essa iniciativa tem como objetivo elevar a participação ferroviária para 30% na matriz de transportes e promover um crescimento superior a 60% na extensão da malha ferroviária até a próxima década. Nesse contexto, o entendimento sobre o complexo comportamento geomecânico da subestrutura, especialmente a longo prazo, torna-se essencial para o desenvolvimento de soluções mais eficazes na mitigação dos custos de manutenção e na ampliação da competitividade das ferrovias frente a outros modais de transporte.

A aplicação de geogrelhas na subestrutura ferroviária como elemento de reforço constitui uma alternativa promissora aos métodos convencionais, com o objetivo de ampliar os intervalos entre os ciclos de manutenção. Devido à elevada resistência à tração presente nos filamentos, as geogrelhas contribuem para a restrição do fluxo lateral das partículas e para o aumento do confinamento dos agregados por meio do mecanismo de intertravamento (Qian et al. 2018; Sweta e Hussaini, 2020; Desbrousses et al., 2023). Entre os principais parâmetros das geogrelhas que influenciam o comportamento geomecânico do lastro sob cargas dinâmicas, destacam-se a abertura da malha, a largura dos filamentos e o módulo de rigidez secante (Brown et al., 2007).

Sob carregamentos cíclicos, a deformabilidade do lastro evolui por meio de incrementos tanto elásticos quanto plásticos (Indraratna et al. 2006; Lackenby et al., 2007; Delgado et al., 2019). A teoria de *shakedown*, amplamente empregada na bibliografia, permite avaliar a deformabilidade de materiais granulares a longo prazo, estabelecendo que o comportamento pode ser estável ou instável, em função do estado de tensões. De acordo com Werkmeister et al. (2001), após um período inicial de acomodação, os materiais podem apresentar três comportamentos distintos: estabilização das deformações plásticas (*shakedown* elástico), evolução contínua das deformações (*shakedown* plástico) ou colapso estrutural por ruptura.

No entanto, a reprodução dos carregamentos dinâmicos atuantes na via permanente em laboratório é desafiadora. O ensaio triaxial de carga repetida (*repeated load test* – RLT) ou triaxial dinâmico é amplamente utilizado na bibliografia para simular as solicitações ferroviárias de forma controlada. Esse método permite avaliar o comportamento a curto ou a longo prazo com a aplicação de pulsos de carga sobre a amostra, que é submetida simultaneamente a uma tensão confinante e a uma tensão desviadora. A carga axial é gerada por uma onda senoidal, composta por um ciclo de carregamento seguido por um intervalo de repouso, enquanto a tensão confinante, fornecida por ar comprimido, atua de forma contínua. No entanto, o comportamento geomecânico do lastro a longo prazo com a inclusão de geogrelhas ainda não é plenamente compreendido.

Diversos fatores influenciam diretamente a complexa interação entre o lastro e a geogrelha, incluindo aspectos intrínsecos, como forma, tamanho e resistência dos agregados, e extrínsecos, como o estado e a trajetória de tensões, bem como as condições de contorno (Indraratna et al., 2013; Sun et al., 2016). Nesse contexto, a avaliação laboratorial exige o isolamento das variáveis de interesse, com o intuito de simplificar a análise e eliminar efeitos de segunda ordem, tornando os resultados mais representativos. Assim, o presente estudo tem como objetivo avaliar o comportamento geomecânico de um lastro reforçado com geogrelha, com ênfase na influência da rigidez do reforço sobre o confinamento dos agregados e na deformabilidade a longo prazo. Para tal, foram utilizadas partículas cimentícias com forma controlada em ensaios de longa duração (deformação permanente – DP), de modo a isolar os efeitos promovidos pela inclusão da geogrelha em comparação ao lastro não reforçado.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Produção e caracterização das partículas de lastro

As partículas de concreto foram moldadas conforme a dosagem de 130 MPa desenvolvida por Conceição et al. (2022) (Tabela 1), sendo classificadas como concreto de ultra-alto desempenho (CUAD). Esse material apresenta uma matriz com densidade significativamente elevada, resultante do uso de agregados finos, o que confere excelente durabilidade. Além disso, sua composição possibilita o controle rigoroso de parâmetros intrínsecos, como o tamanho e a forma das partículas, favorecendo a execução dos ensaios em escala reduzida.

Tabela 1. Dosagem do concreto para 1 m<sup>3</sup> (Conceição et al. 2022).

Material	Massa (kg)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
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

Devido à ampla aplicação em ferrovias do tipo *heavy haul* e em ensaios triaxiais dinâmicos, a graduação n.º 24 (AREMA, 2015) foi adotada como referência para a definição dos limites inferior (LI) e superior (LS) da curva granulométrica, utilizando-se um fator de escala igual a 3,5. 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 de modo a manter o coeficiente de uniformidade próximo de 2,0, reduzindo o índice de fragmentação das partículas ao longo dos ensaios.

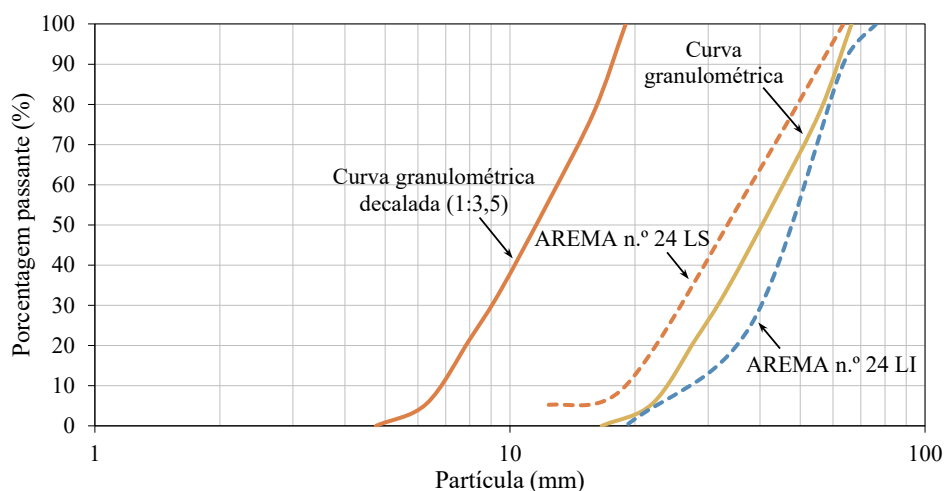


Figura 1. Granulometria do lastro.

Os agregados utilizados, com dimensões entre 19,0 mm e 4,76 mm (Figura 2), apresentam forma cúbica, com o objetivo de evidenciar os efeitos promovidos pela inclusão do elemento de reforço. As arestas foram suavizadas no Micro-Deval para evitar quebras durante a montagem dos corpos de prova. A produção das partículas foi dividida em três etapas: mistura, cura e polimento. Na etapa inicial, a mistura foi preparada com o auxílio de uma haste acoplada a uma furadeira de coluna, uma vez que o uso da argamassadeira não proporcionou a trabalhabilidade desejada do concreto. Em seguida, a mistura foi vertida em moldes de silicone, produzidos a partir de fôrmas confeccionadas por impressão 3D, sendo desmoldada após 48 horas e submetida à cura em água saturada com cal durante 28 dias. Posteriormente, as partículas permaneceram no Micro-Deval por 20 minutos para polimento e arredondamento das arestas. Seis partículas com dimensão de 19,0 mm foram produzidas para a realização dos ensaios de caracterização física (absorção, massa específica e porosidade aparente). Além dos agregados menores, também foram moldadas partículas de 50,0 mm, destinadas aos ensaios de resistência à compressão uniaxial a uma taxa de 0,5 mm/min em prensa universal. Para o ensaio de resistência à abrasão no Micro-Deval, foram utilizadas 1500 gramas de partículas entre 6,2 mm e 12,0 mm com 5 kg de esferas abrasivas com 9,5 mm de diâmetro.



Figura 2. Partículas de concreto (19,0 a 4,76 mm).

## 2.2 Confecção e caracterização das geogrelhas

As geogrelhas Basetrac Grid, especificamente a PET40 e PET65 (Figura 3), foram adotadas como referência para o desenvolvimento das geogrelhas em escala reduzida (modelo). Fabricadas a partir de filamentos de polietileno tereftalato (PET), essas geogrelhas biaxiais apresentam aberturas de malha de 25,0 mm, largura de filamento de 6,0 mm e espessura de 1,0 mm. Com base na caracterização das geogrelhas protótipo por meio de ensaios de tração uniaxial na direção longitudinal, conduzidos a uma taxa de 20 mm/min, foram confeccionadas geogrelhas modelo com fator de escala inicial de 3,5.

Desenvolvidas no software *SketchUp*, as geogrelhas modelo apresentam 7,0 mm de abertura, 1,7 mm de largura do filamento e 0,3 mm de espessura. Essas geogrelhas foram produzidas por meio de impressão 3D, em substituição ao método convencional de corte de filamentos, considerando os critérios estabelecidos por Viswanadham e König (2004) para modelos 1g. O polímero termoplástico PETG (polietileno tereftalato glicol), na cor preta, foi utilizado na confecção da geogrelha de maior flexibilidade (modelo X), enquanto o PLA (ácido polilático), na cor branca, foi empregado para representar o modelo mais rígido (modelo Y).

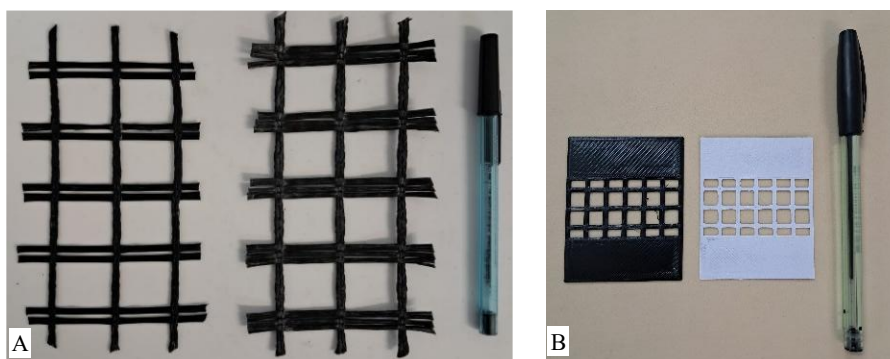


Figura 3. Geogrelhas: (A) PET40 (à esquerda) e PET65 (à direita) e (B) PETG e PLA.

## 2.3 Preparação da amostra e programa de ensaios

O programa experimental foi conduzido por meio de três ensaios de deformação permanente (DP-I, DP-II e DP-III), com o objetivo de avaliar o comportamento do lastro sob carregamento cíclico a longo prazo. O procedimento buscou simular as condições típicas de carregamento encontradas em ferrovias do tipo *heavy haul* — linhas especiais destinadas ao transporte de grandes volumes de carga, como carvão, coque e minério de ferro. Para isso, foi aplicado um pulso senoidal, a uma frequência de 2 Hz, com 100 ms de carga e 400 ms de repouso, conforme as recomendações da norma europeia EN 13286-7 (CEN, 2004).

O corpo de prova cilíndrico, com densidade de 1,0 g/cm<sup>3</sup>, possui 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura (Figura 4). A amostra é composta por partículas cúbicas, fitas de PVC com baixa resistência circunferencial, membranas de látex utilizadas para a impermeabilização, além de anéis de vedação que asseguram a fixação das membranas nos *caps* inferior e superior. A aplicação das fitas tem como finalidade proteger a membrana de látex contra perfurações causadas pelo contato direto com os agregados durante a montagem do corpo de prova.

Seguindo as recomendações da norma europeia, foram utilizadas membranas de látex com espessura inferior a 0,8% do diâmetro do corpo de prova. Para membranas de 0,4 mm de espessura, verificou-se que, para uma tensão de 1,0 kPa, a correção do efeito membrana corresponde a 12% (Figura 4). No entanto, Indraratna et al. (1998) recomendam uma correção de 8%.



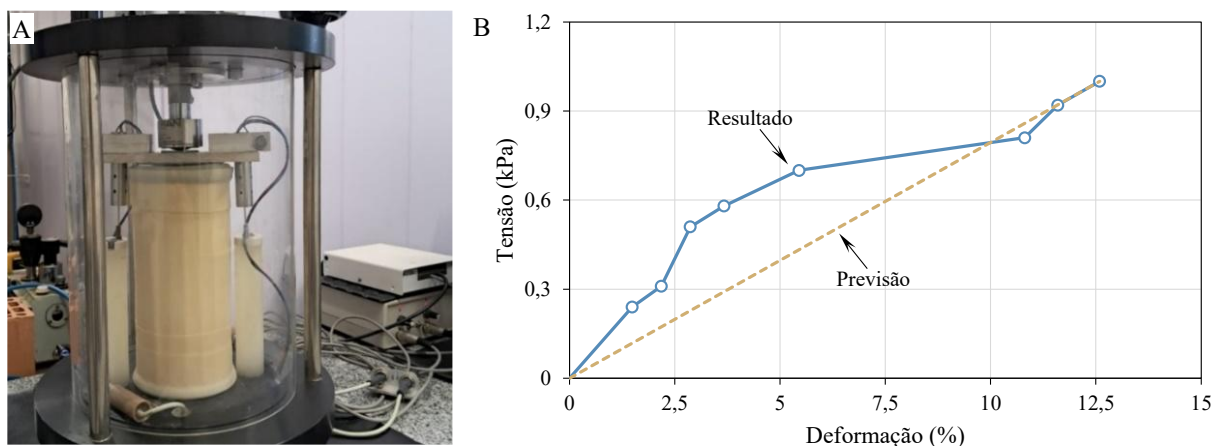


Figura 4. Ensaio triaxial dinâmico: (A) corpo de prova e (B) curva do efeito membrana.

O processo de montagem do corpo de prova iniciou-se com o encaixe das fitas de PVC no cap inferior e a vedação da primeira membrana de látex. Em seguida, agregados com granulometria entre 19,0 mm e 4,76 mm foram adicionados e compactados em três camadas de 6,6 cm. Durante essa etapa, utilizou-se um suporte de PVC para manter as fitas posicionadas verticalmente, garantindo a estabilidade da amostra. Nos ensaios com reforço (DP-II e DP-III), a geogrelha foi posicionada após a compactação da primeira camada.

Após o preenchimento das três camadas e fixação do cap superior, a segunda membrana de látex foi aplicada ao corpo de prova. Posteriormente, um cabeçote de PVC foi fixado no cap superior, e os dois transdutores de deslocamento linear (linear variable differential transducers – LVDTs), responsáveis pela medição das deformações axiais, foram calibrados individualmente. A norma europeia EN 13286-7 (CEN, 2004) recomenda a utilização de três transdutores distribuídos ao longo da amostra em ensaios RLT. Contudo, o terceiro transdutor não pôde ser instalado em virtude de limitações no equipamento e no sistema de aquisição de dados.

No cap inferior, foi instalado um dreno conectado a uma bomba de vácuo com o objetivo de verificar a integridade da membrana de látex, identificando eventuais perfurações, além de prevenir deformações adicionais na amostra antes do início dos ensaios.

O carregamento foi aplicado por meio de um sistema pneumático composto por pistão, célula de carga com capacidade de 5 kN, regulador de pressão, válvula solenoide e atuador. Para promover o confinamento da amostra, utilizou-se ar comprimido, conectado diretamente ao sistema. Os ensaios triaxiais foram conduzidos pelo método de estágio único (EU), no qual apenas um nível de tensão foi aplicado à amostra. Foram adotadas uma tensão confinante de 70 kPa e uma tensão desviadora de 280 kPa, definidas a partir de formulações empíricas com base nos dados fornecidos por Delgado et al. (2019), considerando uma ferrovia do tipo *heavy haul*, com carga por eixo de 32,5 toneladas e velocidade média de operação de 80 km/h.

Por meio do sistema de aquisição de dados, foi possível monitorar as principais configurações do ensaio, incluindo o estado de tensões, as leituras dos LVDTs, a contagem total de ciclos, o ciclo em execução, além dos tempos de carga e repouso de cada pulso. No entanto, em função das limitações do sistema, não foi viável registrar a deformação individual correspondente a cada ciclo, sendo possível apenas a obtenção dos valores acumulados após o número de ciclos estabelecido previamente. Dessa forma, as deformações acumuladas foram registradas a cada 50 mil ciclos até o total de 250 mil ciclos. A partir desse ponto, as medições foram realizadas nos ciclos de 350 mil, 450 mil, 550 mil, 700 mil e, por fim, 1 milhão de ciclos.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Ensaio de caracterização física e mecânica das partículas de lastro

Os ensaios de caracterização dos agregados indicaram que as partículas apresentaram resistência à compressão próxima a 120 MPa. Além disso, a resistência obtida foi apenas 3,71% inferior à da rocha natural, evidenciando a qualidade do material. Entretanto, os materiais granulares exibiram diferenças



2025

significativas em comparação com os agregados produzidos por Conceição et al. (2022). A resistência à compressão foi 9,56% inferior, o desgaste por abrasão foi 62,3% superior, enquanto a porosidade foi 58,7% superior. Essas variações estão associadas a uma reação adversa provocada pelo aditivo superplastificante.

Tabela 2. Propriedades das partículas de lastro.

Propriedade	Resultado desse estudo	UHPC*	Gnaiss*
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	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 Ensaios de tração nas geogrelhas modelo e protótipo

A partir dos ensaios de tração realizados nas geogrelhas protótipo, foram definidos os critérios para a fabricação das geogrelhas modelo. Devido à textura lisa presente em ambos os polímeros, foram observados escorregamentos nos primeiros testes, o que comprometeu a precisão das medições de deslocamento pelo sistema. Para contornar essa dificuldade, nas tentativas subsequentes foram aplicadas lixas de baixa gramatura nas superfícies de contato das garras de aperto frontal. Considerando que os polímeros PETG e PLA possuem rigidez maior em comparação com a textura mais flexível e rugosa das geogrelhas PET40 e PET65, os filamentos rompiam durante a execução dos ensaios. Para resolver esse problema, a espessura dos filamentos foi aumentada de 0,3 mm para 0,6 mm, permitindo a continuidade dos testes. De acordo com a Tabela 3, os ensaios de tração indicaram que 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). Entretanto, as resistências das geogrelhas Basetrac Grid obtidas nos ensaios de tração foram inferiores aos valores comerciais especificados pelo fabricante, correspondentes a 40 kN/m e 65 kN/m, respectivamente.

Tabela 3. Propriedades das geogrelhas protótipo e modelo.

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 ( $\pm 0,95$ )	40,10 ( $\pm 1,20$ )	2,86 ( $\pm 0,01$ )	4,11 ( $\pm 0,01$ )
Deformação (%)	7,12 ( $\pm 0,43$ )	6,47 ( $\pm 0,23$ )	2,37 ( $\pm 0,03$ )	2,02 ( $\pm 0,09$ )
Rigidez secante (kN/m)	410,35 ( $\pm 29,56$ )	619,80 ( $\pm 29,47$ )	120,69 ( $\pm 1,63$ )	203,66 ( $\pm 1,36$ )

### 3.3 Ensaios triaxiais de longa duração

Observa-se que os incrementos de deformação plástica foram maiores nos primeiros 350 mil ciclos até atingir uma tendência de estabilização como relatado por Qian et al. (2018), ainda que os materiais granulares não tenham atingido a condição de *shakedown* elástico. Considerando que os ensaios de deformação permanente foram realizados sob 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. No entanto, ambas as geogrelhas demonstraram desempenho positivo na redução das deformações plásticas. Em comparação ao ensaio sem reforço (DP-I), a geogrelha PETG apresentou uma redução de até 40,8% nas deformações (DP-II), enquanto a geogrelha PLA proporcionou uma redução ainda mais significativa, alcançando até 52,5% (DP-III) (Figura 5).

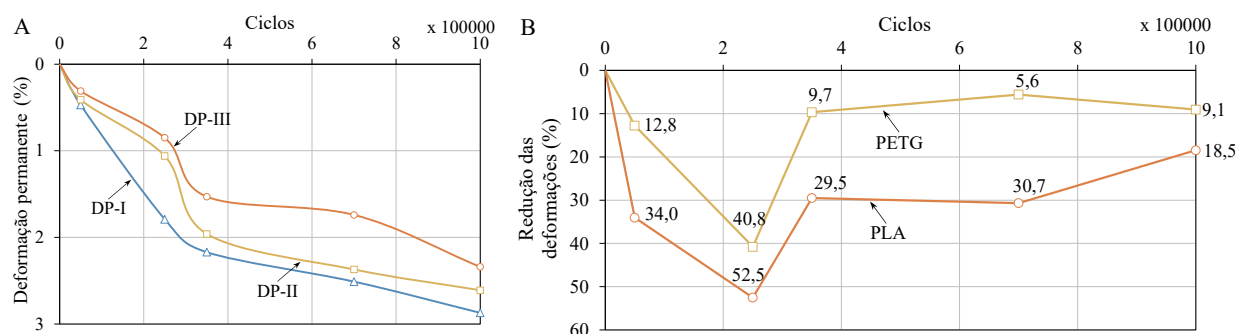


Figura 5. Comportamento geomecânico do lastro sob carregamento dinâmico a longo prazo: (A) deformação por número de ciclos e (B) efeito da geogrelha na deformabilidade.

Considerando a abertura de malha de 7 mm e o diâmetro médio das partículas de 11,7 mm, obteve-se uma razão entre abertura e diâmetro médio ( $a/d_{50}$ ) igual a 0,6, correspondendo a uma zona de bloqueio fraca. McDowell et al. (2006) indicam que a relação ideal se situa entre 1,1 e 1,4, Indraratna et al. (2013) sugerem uma faixa ideal entre 0,95 e 1,2, enquanto Han et al. (2018) recomendam valores entre 1,3 e 1,7. Dessa forma, a abertura adotada nesta pesquisa reduziu o efeito de intertravamento entre o agregado e a geogrelha. Esses resultados evidenciam a influência da abertura da malha e da rigidez secante na deformabilidade do lastro observada por Brown et al. (2007). Entretanto, é importante salientar que a elevada rigidez presente nas geogrelhas PETG e PLA (Figura 6), aliada ao alto nível de confinamento aplicado (70 kPa), pode ter influenciado significativamente os resultados obtidos.

Portanto, novos estudos devem ser realizados sob níveis de confinamento mais baixos para simular com maior fidelidade as condições do lastro na via. Além disso, recomenda-se a confecção de geogrelhas mais flexíveis e com uma zona de bloqueio entre 1,2 e 1,4 para aprimorar o efeito de interação com o lastro.

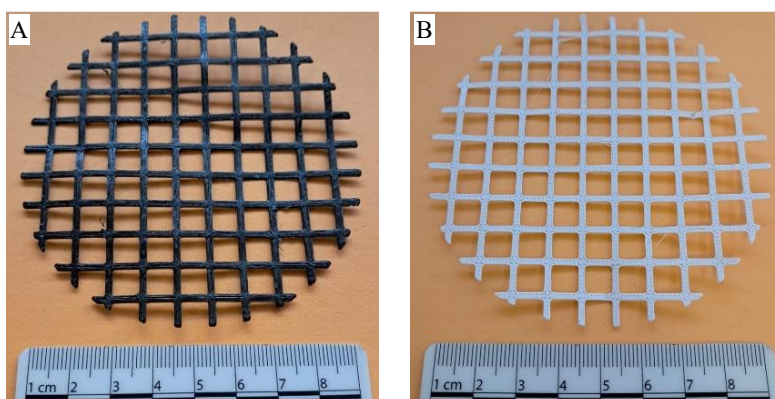


Figura 6. Estado das geogrelhas modelo após os ensaios DP: (A) PETG e (B) PLA.

## 4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados dos ensaios triaxiais de carga repetida, conclui-se que os benefícios promovidos pelas geogrelhas foram mais evidentes nos primeiros ciclos de carga devido ao período de acomodação dos grãos, entretanto, os efeitos da interação lastro-geogrelha foram reduzidos pelos altos níveis de confinamento aplicados pelo sistema. Como esperado, o polímero PLA promoveu um maior enrijecimento do lastro para todos os níveis de confinamento em comparação com o PETG. Contudo, a elevada rigidez e a textura lisa presente nas geogrelhas modelo inibiram o grau de adaptabilidade com os agregados, enquanto a abertura da malha influenciou a mobilização do efeito de intertravamento, resultando em uma flexibilidade de interação parcial com o lastro.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPERJ, pelo apoio financeiro, a HUESKER, pelo fornecimento das geogrelhas Basetrac Grid, e 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).
- Han, B.; Ling, J.; Shu, X.; Gong, H.; Huang, B. (2018) Laboratory investigation of particle size effects on the shear behavior of aggregate-geogrid interface. *Construction and Building Materials*, 158, p. 1015-1025.
- 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.