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.

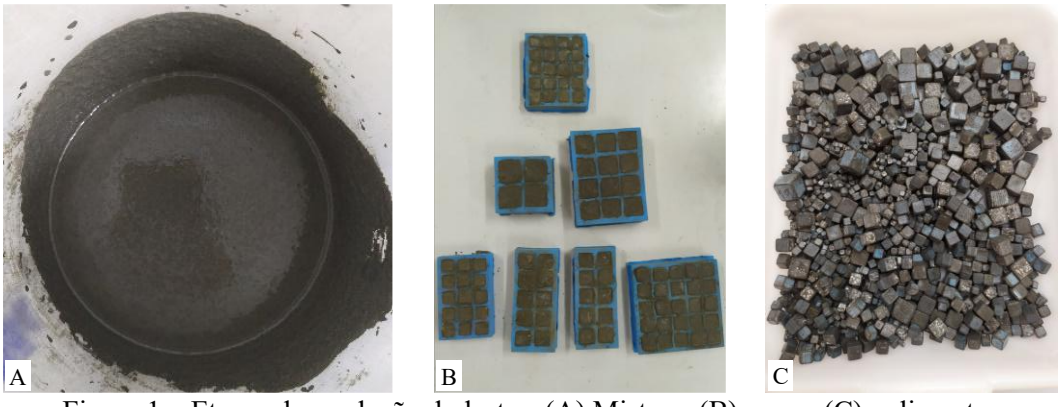


Figura 1 – Etapas de produção do lastro: (A) Mistura, (B) cura e (C) polimento.

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.

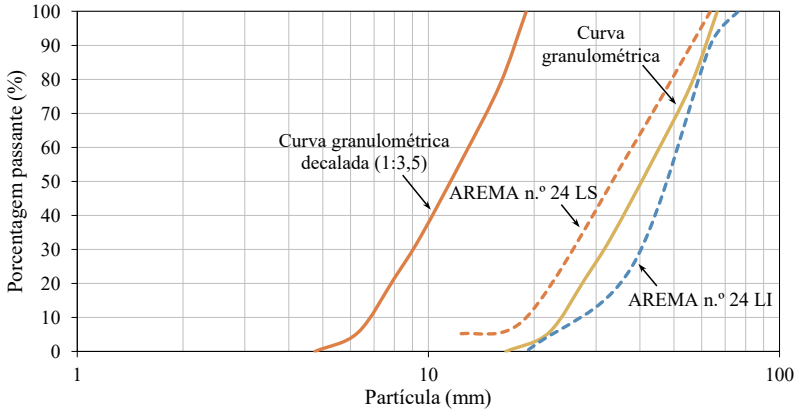


Figura 2 – Curva granulométrica do lastro.

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).

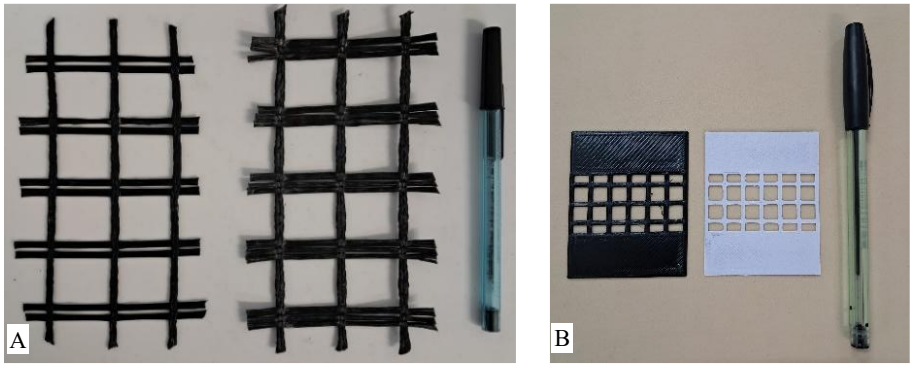


Figura 4 – Geogrelhas: (A) PET40 (à esquerda) e PET65 (à direita) e (B) PETG e PLA.

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.

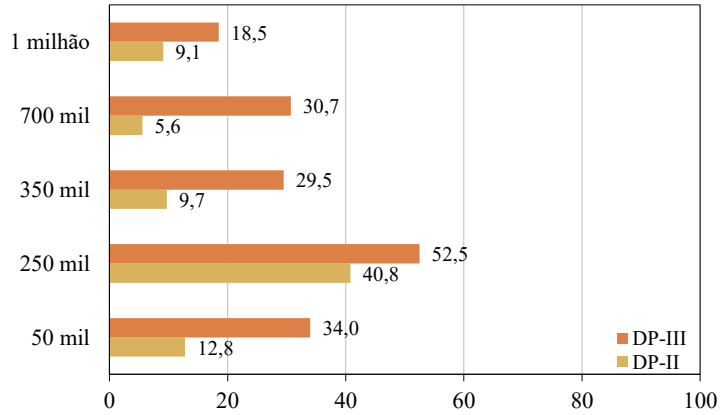


Figura 6 – Percentual de redução dos incrementos de deformação plástica por número de ciclos

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.

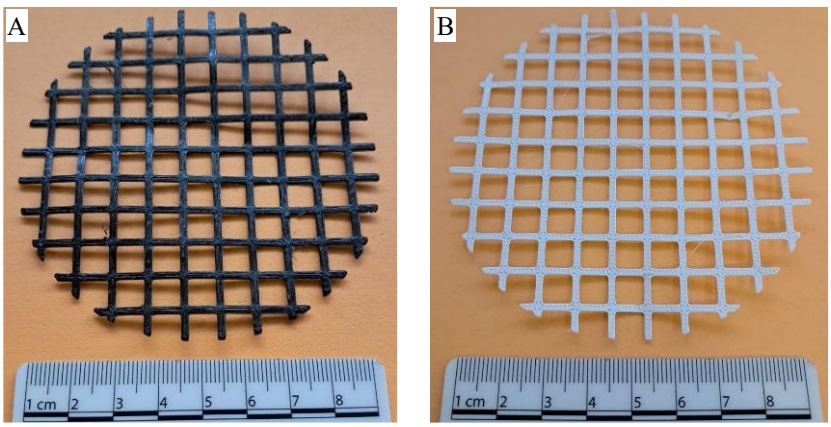


Figura 7 – Condição das geogrelhas após os ensaios de longa duração: (A) PETG e (B) PLA

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.