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/COBRAMSEG2026.6/35

Ensaios de Tração em Geogrelhas Produzidas em Impressora 3D com Garrafas PET Recicladas Visando Aplicação em Obras de Pequeno Porte

Julia Ferreira Duarte
Graduanda, Universidade Presbiteriana Mackenzie, Campinas, Brasil, julia.ferreiraduarte14@gmail.com

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

RESUMO: Geogrelhas são amplamente utilizadas como reforço em geotecniage devido à sua eficiência. A impressão 3D apresenta potencial para sua fabricação em pequena escala, sob demanda e com diferentes geometrias. Com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico à tração, foram produzidas geogrelhas de PET em impressora 3D (K1 Max da Creality). Ensaios de tração (NBR 10319) foram realizados na Instron 34TM-10-SA, com velocidade de deformação de 20 mm/min, para 12 geogrelhas: 3 baseadas no modelo Tensar SS20 em PET virgem e 9 baseadas no modelo Huesker 200T (5 em PET virgem e 4 em PET reciclado). A resistência à tração das geogrelhas baseadas na Tensar variou entre 5,35 e 8,96 kN/m, cerca de 27% a 45% do valor usado como referência (20 kN/m). Para as geogrelhas baseadas na Huesker em PET virgem apresentaram resistência entre 15,90 e 18,54 kN/m, enquanto as em PET reciclado variaram entre 2,71 e 7,65 kN/m, equivalendo a aproximadamente 85% a 93% e 14% a 38%, respectivamente, do valor de referência. Conclui-se que a impressão 3D apresenta potencial técnico preliminar para aplicações de pequena escala e sob menores solicitações. Entretanto, as amostras produzidas com PET virgem apresentaram resistência à tração superior à das amostras produzidas com PET reciclado.

PALAVRAS-CHAVE: Geogrelha, Impressão 3D, Ensaio de Tração, Garrafas PET, Reciclagem.

ABSTRACT: Geogrids are widely used as reinforcement elements in geotechnical engineering due to their efficiency. Three-dimensional printing shows potential for their small-scale, on-demand manufacture with different geometries. To evaluate their tensile mechanical behavior, PET geogrids were produced using a Creality K1 Max 3D printer. Tensile tests were conducted in accordance with NBR 10319 using an Instron 34TM-10-SA universal testing machine at a displacement rate of 20 mm/min. A total of 12 geogrids were tested: three based on the Tensar SS20 model and manufactured from virgin PET, and nine based on the Huesker 200T model, of which five were manufactured from virgin PET and four from recycled PET. The tensile strength of the Tensar-based geogrids ranged from 5.35 to 8.96 kN/m, corresponding to approximately 27% to 45% of the reference value of 20 kN/m. The Huesker-based geogrids manufactured from virgin PET exhibited tensile strengths ranging from 15.90 to 18.54 kN/m, whereas those manufactured from recycled PET ranged from 2.71 to 7.65 kN/m. These values corresponded to approximately 85% to 93% and 14% to 38%, respectively, of the reference value. It was concluded that 3D printing shows preliminary technical potential for small-scale applications subjected to lower loads. However, the specimens manufactured from virgin PET exhibited higher tensile strength than those manufactured from recycled PET.

KEYWORDS: Geogrids, 3D Printing, Tensile Test, PET Bottle, Recycling.

1 INTRODUÇÃO

A aplicação de geossintéticos vem se tornando cada vez mais frequente na engenharia geotécnica e ambiental, incluindo pavimentação, controle de erosão e estabilidade de taludes. As geogrelhas são empregadas principalmente com função de reforço e são produzidas com diferentes geometrias, dimensões, orientações, matérias-primas e processos de fabricação, de acordo com os requisitos de cada aplicação. Neste

sentido, a impressão 3D apresenta potencial para a produção de geogrelhas, pois permitiria uma maior customização de suas características e o ajuste de materiais e geometrias para atender requisitos específicos (HASHEMINEZHAD et al., 2025). A impressão 3D também permite fabricar geometrias complexas ou de difícil obtenção por outros métodos (TYLMAN, DZIERZEK, 2020). Assim, devido à sua versatilidade, a impressão 3D poderia facilitar a produção de geogrelhas em pequena escala, sob demanda e com geometrias diferentes, o que pode representar vantagens na aplicação em obras de pequeno porte.

A utilização de PET reciclado como matéria-prima é bastante relevante, evidenciada pelas 410 mil toneladas de PET pós-consumo recicladas no ano de 2024 (STATISTA, 2024). Apesar das dificuldades de manuseio e processamento desse material decorrentes da necessidade de diferentes etapas no processo de reciclagem antes de sua reutilização (GILENO, TURCI, 2021), bem como da degradação estrutural do polímero a cada ciclo de reprocessamento (FROUNCHI, 1999), o PET reciclado ainda apresenta grande potencial de reuso. Assim, novas alternativas de reutilização e reciclagem do PET podem contribuir para a redução de impactos ambientais, como a redução das emissões de CO_2 associadas à extração da matéria-prima (GILENO, TURCI, 2021; HASHEMINEZHAD et al., 2026; VICUÑA et al., 2024).

O uso de PET na produção de geogrelhas vem gradualmente ganhando espaço e geogrelhas de PET já são comercializadas como, por exemplo, a Fortrac T Eco da Huesker produzida em PET (Huesker, 2023). Estudos com geogrelhas fabricadas com PET reciclado e virgem também estão começando a ser desenvolvidos. No estudo de Hasheminezhad et al. (2025) foram produzidas e implementadas geogrelhas e outros geossintéticos de PET reciclado e PP reciclado. Os ensaios de tração das geogrelhas impressas em impressora 3D, usando PET 100% reciclado e produzidas em uma escala de 1:10, apresentaram resultados semelhantes às geogrelhas manufaturadas de fibras sintéticas virgem, quando considerado o efeito de escala, sendo os valores obtidos para geogrelhas biaxiais e monoaxiais de: 6,53 e 16,5 kN/m (PET reciclado) e 40 e 64 kN/m (PET virgem), respectivamente. Vicuña *et al.* (2024) apresentaram um estudo sobre o comportamento mecânico de *blends* de PEAD e PP reciclados utilizados na produção de geogrelhas, por meio de ensaios de tração e flexão. Foram exploradas diferentes composições PP/PEAD (0/100, 25/75, 50/50, 75/25 e 100/0% em massa) e configurações de geogrelhas. Os resultados indicaram maior capacidade de deformação do PEAD reciclado puro (PP/PEAD 0/100), o qual apresentou deformação superior a 60% em comparação com as misturas PP/PEAD. Além disso, os autores ressaltam a importância da configuração dos fios e dos blends nas propriedades mecânicas e desempenho das geogrelhas, e apontam o potencial dos polímeros reciclados como uma solução viável para a produção deste material.

A possibilidade da adaptação das características como geometria, matéria-prima e dos modos de produção constituem uma oportunidade de avanço tecnológico e inovação para a produção de geogrelhas em pequena escala e sob demanda o que indica potencial para aplicações específicas em pequena escala e sob menores solicitações.

Assim, nesta pesquisa foram produzidas geogrelhas em impressora 3D baseadas em geogrelhas comerciais, Tensar SS20 e Huesker Fortrac T Eco 200T, utilizando-se filamentos de PET virgem e PET reciclado, com o objetivo de avaliar preliminarmente o comportamento mecânico à tração.

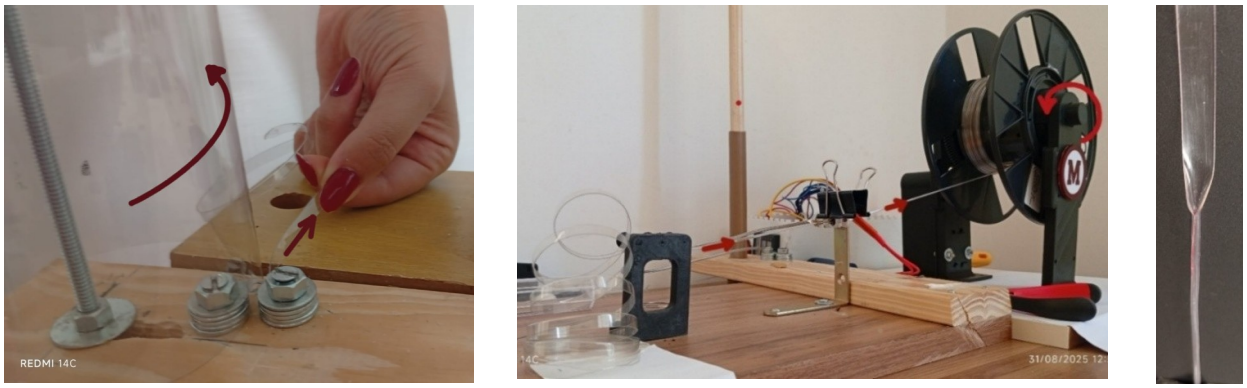
2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a fabricação das geogrelhas em impressora 3D e posterior realização dos ensaios de tração, foi necessária a compra do filamento de PET virgem e a fabricação do filamento reciclado utilizando-se garrafas PET usadas.

2.1 Estações de reciclagem de garrafas PET para fabricação do filamento

Para a fabricação das geogrelhas por meio de impressão 3D, foram utilizados filamentos de PET virgem adquiridos em loja especializada (marca F3D) e filamentos produzidos a partir de garrafas PET pós-consumo (Sprite Lemon Fresh 1,5 L), manufaturada em uma estação de reciclagem desenvolvida nesta pesquisa.

A estação de reciclagem é composta por um filetador que transforma a garrafa em tiras (Figura 1a) e por um conjunto de extrusão que transforma as tiras em filamento de forma constante e padronizada (Figura 1b). O filetador funciona através de um mecanismo manual que, ao ser acionado, corta as garrafas em tiras uniformes e contínuas de 6 mm de largura (Figura 1a). Já a estação de extrusão é composta por um carretel motorizado que puxa as tiras em velocidade constante, fazendo-as atravessar um bico de aquecimento que eleva sua temperatura e as molda de forma uniforme em filamentos ocos com diâmetro de 2 mm (Figura 1c).



(a) (b) (c)

Figura 1. Estações de reciclagem: (a) filetador e, (b) estação de extrusão, (c) recorte do filamento oco.

2.2 Impressão 3D

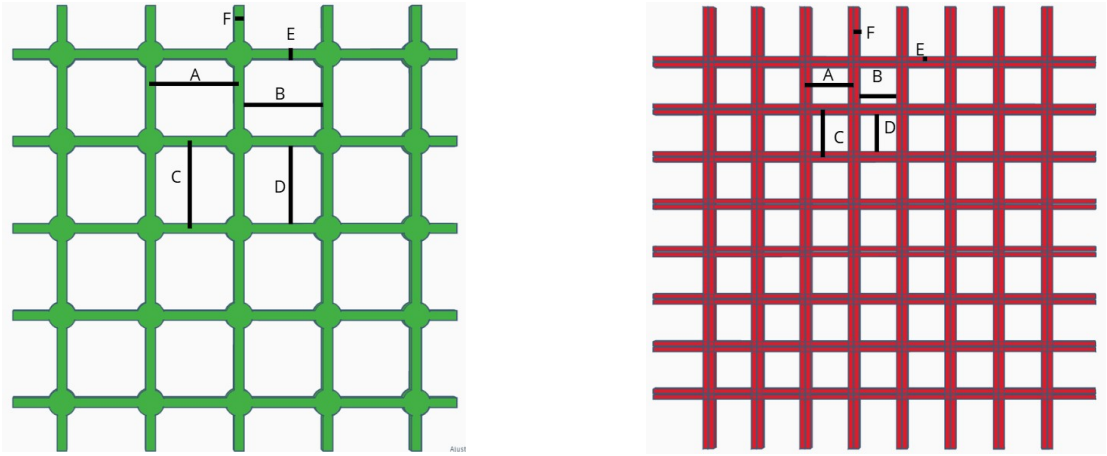
A impressora utilizada para a produção das geogrelhas foi a K1 Max da marca Creality, a qual apresenta dimensão de construção máxima de 30x30x30 cm e permite a impressão com diferentes tipos de polímeros. De forma a diminuir a possibilidade de causar danos à impressora e defeitos na estrutura do filamento, o que poderia comprometer a sua resistência, as configurações iniciais e ajustes da impressora foram redefinidas com base nas recomendações do fabricante e de Dzieezek (2020). Porém, modificações adicionais foram necessárias para a produção segura de geogrelhas de PET, tendo sido necessários muitos testes de desempenho e reconfigurações. Assim, foram realizadas modificações na configuração, como das temperaturas de extrusão e da cama aquecida, velocidade de extrusão, fluxo e modificações físicas (espessura do bico de extrusão, tipo de cola utilizada para fixação do filamento e modo de fixação da impressão na cama aquecida). Isso foi necessário para que se pudesse realizar uma boa impressão utilizando-se o filamento PET reciclado, considerando as diferenças de resistências, flexibilidade, viscosidades e temperatura de fusão entre os polímeros. Os detalhes das modificações realizadas serão descritos e analisados de forma mais detalhada em um artigo atualmente em elaboração.

2.3 Geogrelhas

Foram produzidos dois modelos de geogrelhas: um baseado no modelo Tensar SS20 (Figura 2a) e outro no modelo Huesker Fortrac T Eco 200T (Figura 2b). Ambos os modelos foram fabricados com resina de PET virgem, já o modelo Huesker foi também produzido em PET 100% reciclado produzido nas estações de reciclagem pelas autoras. Ao todo, foram produzidas 3 (três) unidades do modelo Tensar SS20 em PET virgem e, 9 (nove) unidades do modelo Huesker 200T, sendo 5 (cinco) de PET virgem e 4 (quatro) de PET reciclado. As características, como dimensões e resistência das geogrelhas segundo os fabricantes foram apresentadas na Tabela 1, juntamente com as características das geogrelhas produzidas nesta pesquisa.

As geogrelhas Tensar SS20 produzidas pelo fabricante são do tipo extrudadas e possuem eixo biaxial com medidas de espessura, largura e comprimento diferentes nos dois eixos. Já as geogrelhas produzidas neste trabalho foram modificadas, apresentando medidas de espessura, largura (E e F) e comprimento (A e C) iguais nos dois eixos. Outras modificações foram aplicadas às geogrelhas produzidas, devido às

limitações impostas pela impressora 3D como, por exemplo, a maior espessura no nó apresentada pela Tensar SS20 do fabricante, não foi executada na geogrelha produzida, em decorrência da necessidade de fabricação de suportes (durante a impressão 3D), o que causaria grande desperdício de material e muito retrabalho. As dimensões de espessura (2,0 mm) e largura das faixas E e F (4,9 mm) das geogrelhas produzidas foram modificadas do modelo do fabricante, porém, mantendo-se a mesma proporção existente, ou seja, considerando que a espessura da geogrelhas do fabricante de 1,2 mm é quase 2,5 vezes a largura da faixa (E) de 2,8 mm.



(a) (b)

Figura 2. Projeto tridimensional das geogrelhas: (a) baseada no modelo Tensar SS20 e (b) no modelo Huesker 200T

Tabela 1. Características das geogrelhas Tensar SS20 e Huesker 200T e das geogrelhas produzidas (Tensar, 2019; Huesker, 2023). A: Comprimento entre o eixo sentido longitudinal; B: Comprimento de abertura do eixo sentido; C: Comprimento entre o eixo sentido transversal; D: Comprimento de abertura sentido transversal; E: Largura das faixas sentido transversal e F: Largura das faixas sentido longitudinal.

Propriedades	Tensar SS20 (fabricante)	Modelo baseado na Tensar SS20 (produzida pelas autoras)	Huesker Fortrac 200T (fabricante)	Modelo baseado na Huesker 200T (produzida pelas autoras)
Matéria-Prima	PP	PET	PET	PET
A (mm)	39	50	30	30
B (mm)	36,2	35	23	23
C (mm)	39	50	30	30
D (mm)	36,7	35	23	23
E (mm)	2,8	4,9	-	3
F (mm)	2,3	4,9	-	2
Espessuras das faixas (mm)	1,6 - 1,2	2	-	2
Espessuras do nó (mm)	3,8	2	-	2
Resistência máxima à tração (kN/m)	20	-	20	-
Deformação na resistência nominal à tração (%)	10	-	10	-

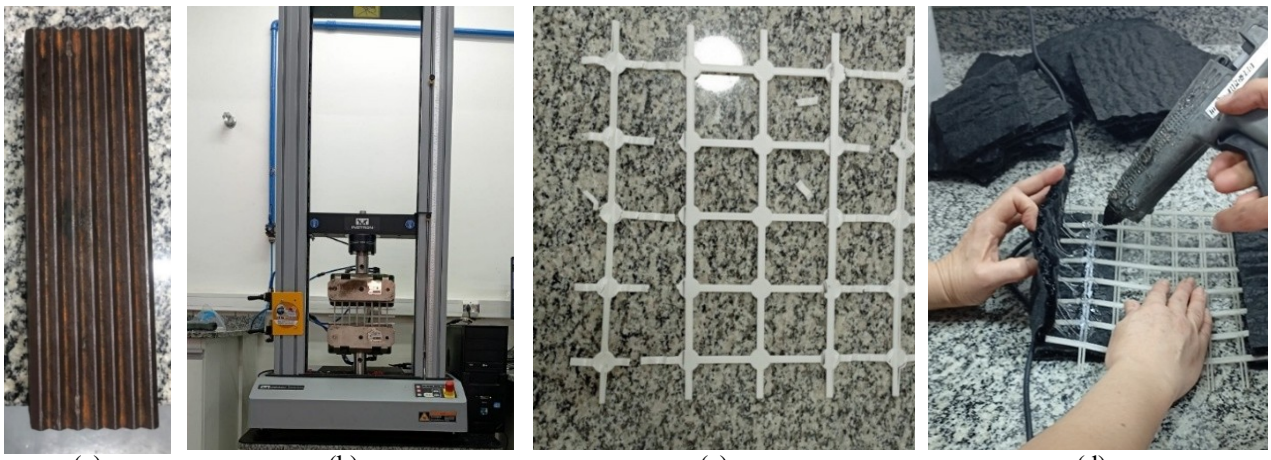
As geogrelhas Fortrac 200T da Huesker foram selecionadas por apresentarem melhor correspondência da matéria-prima (PET), porém, como houve alteração de material, geometria e processo de fabricação, a comparação com as geogrelhas Tensar e Huesker produzidas pelo fabricante foi usada como referência nominal, não como equivalência direta. As medidas das aberturas das geogrelhas produzidas com base na

Huesker Fortrac 200T foram mantidas iguais às dimensões da geogrelha do fabricante, ou seja, eixo biaxial com abertura de 23,0 mm por 23,0 mm (B e D). Porém, como algumas dimensões não foram descritas no catálogo da Huesker (2014), estas foram estimadas em função da abertura entre as faixas longitudinais e (B e D) disponibilizadas como, por exemplo, a espessura geral das faixas (estimada em 2 mm) e as dimensões das faixas transversais (E) estimada em 3 mm e das faixas longitudinais (F) estimada em 2 mm.

3 ENSAIOS DE TRAÇÃO

Os ensaios foram realizados no Laboratório da Maccaferri Brasil, Jundiaí, São Paulo, no dia 11 de setembro de 2025. Ao todo, foram executados 12 ensaios de tração (3 geogrelhas baseadas no modelo Tensar SS20 e 9 geogrelhas baseadas no modelo Huesker 200T). Os ensaios de tração das geogrelhas seguiram as normas NBR ISO 9862 (ABNT, 2013) e NBR 10319 (ABNT, 2013), utilizando-se garras ranhuradas (Figura 3a) e o equipamento Instron 34TM-10-SA (Figura 3b).

A Instron 34TM-10-SA apresenta capacidade nominal de carga de 10 kN e erro de 1% ou 0,1 kN. A velocidade de deformação imposta durante o ensaio foi de 20 mm/min. As garras utilizadas nos ensaios foram desenvolvidas para ensaiar geossintéticos tecidos que são flexíveis e, portanto, se moldam adaptando-se contra as garras ranhuradas, oferecendo melhor aderência entre os materiais. Porém, como as geogrelhas ensaiadas são produtos mais rígidos, estas não conseguem se adaptar contra as garras. Assim, as garras ranhuradas foram inicialmente testadas diretamente em contato com uma geogrelha que apresentou uma falha generalizada no contato garra-geogrelha imediatamente após fixação, mesmo sem nenhuma carga ter sido aplicada ao ensaio (Figura 3c). Para contornar esse problema, foram utilizados geossintéticos maleáveis como suporte de fixação entre a garra e as geogrelhas. Assim, o geossintético maleável foi fixado à geogrelha com o auxílio de cola quente, o que evitou a ocorrência de rupturas no contato garra-geogrelha (Figura 3d).



(a) (b) (c) (d)

Figura 3. (a) Garra ranhurada; (b) Instron 34TM-10-SA utilizada nos ensaios; (c) falha generalizada e (d) Aplicação de camadas de geossintéticos flexíveis nos dois lados da geogrelha para proteção contra as garras.

4 RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos dos ensaios de tração e as Figuras 4 e 5 os gráficos força versus deformação. Para a amostra 3, o equipamento falhou em registrar o gráfico.

As geogrelhas baseadas na Tensar SS20 fabricadas em PET virgem (amostras 1, 2 e 4) apresentaram resistência à tração variando entre 5,35 e 8,96 kN/m com média de 7,69 kN/m, ou seja, em média 38,5% da resistência do valor nominal declarado pelo fabricante de 20,00 kN/m. A deformação à tração na ruptura variou entre 3,27% e 4,17%, valores inferiores ao do fabricante de 10,00%. Assim, as geogrelhas modelo Tensar, fabricadas em PET virgem, apresentaram menor resistência e menor deformabilidade quando comparadas aos valores nominais de referência do produto comercial (Figura 4).

A resistência à tração das geogrelhas baseadas na Huesker 200T fabricadas em PET virgem (amostras 3, 5, 6, 7 e 8) variou entre 10,34 kN/m e 21,22 kN/m. A amostra 3 apresentou valor superior ao valor nominal de resistência informado pelo fabricante (20,00 kN/m) e as amostras 7 e 8 atingiram, respectivamente, 18,06 kN/m e 18,54 kN/m, ou seja, em média 91,5% do valor nominal de resistência informado pelo fabricante. A resistência à tração média obtida para a Huesker em PET virgem foi de 16,81 kN/m, considerando todas as amostras ensaiadas. A deformação na ruptura variou entre 6,21% e 12,24%, com média de 7,53% considerando todas as amostras ensaiadas, apesar de a média ser inferior ao valor nominal de deformação informado pelo fabricante (10,00%), a amostra 6 apresentou deformação superior. Assim, as geogrelhas baseadas no modelo Huesker fabricadas em PET virgem apresentaram maior rigidez em relação ao valor nominal de referência do produto comercial e sua resistência aproximou-se desse valor (Figura 5a). Interessante notar que a amostra 6 foi a que apresentou a menor resistência à tração e maior deformação na ruptura, caracterizando comportamento mais dúctil, porém, suportando metade do valor nominal informado pelo fabricante.

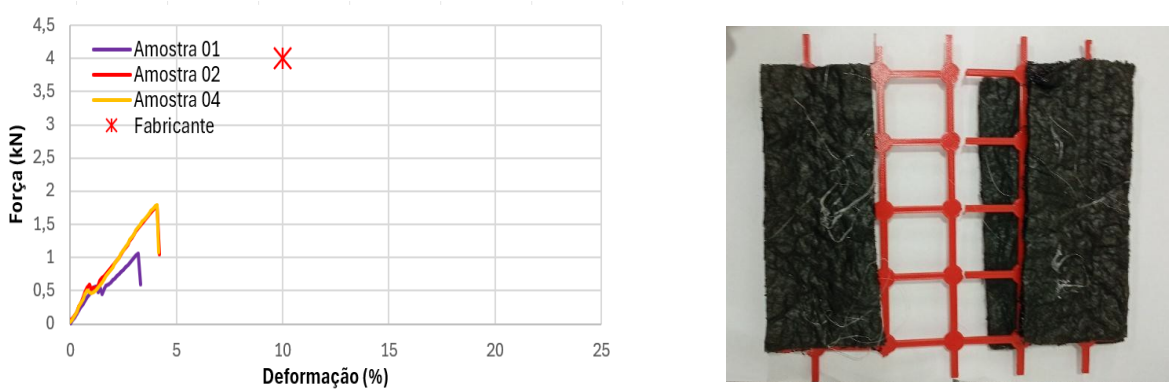
Tabela 2. Resultado do ensaio de tração das geogrelhas produzidas.

Ensaio	Modelo	Tipo de Filamento	Resistência à tração ou Força/largura (Tmáx) (kN/m)	Média Resistência à tração (kN/m)	Deformação à tração na Ruptura (%)	Média Deformação (%)	Rigidez Secante (j) (kN/m)	Média Rigidez Secante (kN/m)
1	Tensar	PET virgem	5,35	7,69	3,27	3,86	163,61	196,54
2	Tensar		8,75		4,17		209,83	
4	Tensar		8,96		4,14		216,18	
3	Huesker	PET virgem	21,22	16,81	6,59	7,53	321,7	248,4
5	Huesker		15,9		6,21		256,04	
6	Huesker		10,35		12,24		84,56	
7	Huesker		18,06		6,37		283,36	
8	Huesker		18,54		6,26		296,33	
9	Huesker	PET reciclado	7,65	4,94	4,05	3,33	188,89	143,06
10	Huesker		3,31		3,11		106,11	
11	Huesker		6,07		3,34		181,14	
12	Huesker		2,71		2,81		96,09	

As geogrelhas baseadas no modelo Huesker com PET reciclado (amostras 9, 10, 11 e 12) apresentaram uma resistência média de 4,94 kN/m e variação entre 2,71 kN/m e 7,65 kN/m, com deformação na ruptura variando entre 2,81% e 4,05% e média de 3,33%. Ambos os parâmetros ficaram abaixo dos valores nominais de referência informados pelo fabricante, indicando comportamento mais frágil e menor capacidade mecânica global (Figura 5b).

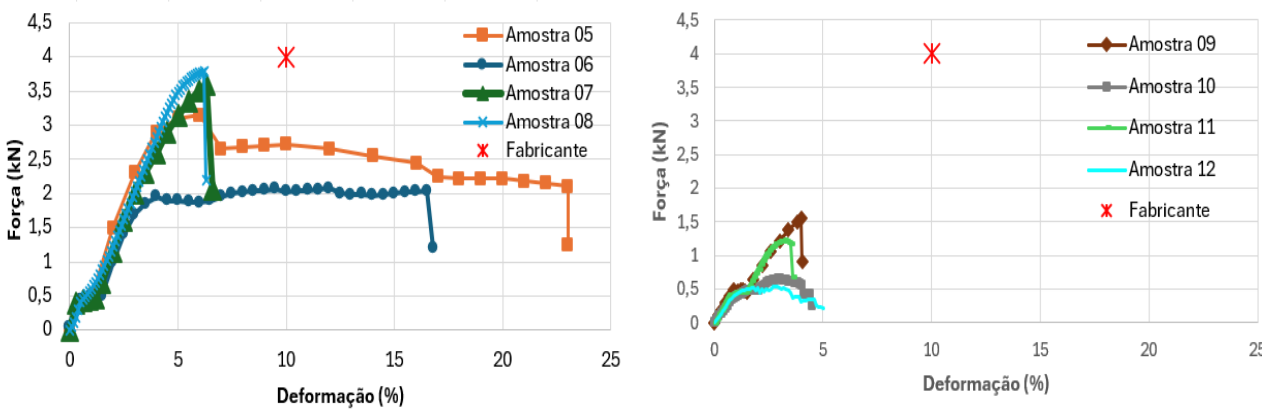
De modo geral, as geogrelhas produzidas com filamento reciclado apresentaram resistência média aproximadamente quatro vezes inferior àquelas de mesmo modelo com filamento PET virgem, 4,94 e 16,81 kN/m, respectivamente. Este resultado está de acordo com Hasheminezhad *et al.* (2025), que verificou que as resistências à tração das geogrelhas produzidas com PET reciclado são cerca de quatro vezes menores que a resistência das geogrelhas de PET virgem.

Com relação à rigidez secante, observou-se que as geogrelhas modelo Huesker em PET virgem são as mais rígidas (248,4 kN/m), seguido pelo modelo Tensar em PET virgem (196,5 kN/m) e pela Huesker em PET reciclado (143,0 kN/m). O resultado sugere que o modelo Huesker de PET reciclado se deforma mais quando submetido a uma mesma carga, portanto, tende a apresentar comportamento mais flexível e deformável.



(a) (b)

Figura 4. (a) Gráfico força (kN) versus deformação (%) para as geogrelhas modelo Tensar PET virgem e (b) geogrelha após ruptura frágil (Amostra 1-Tensar PET virgem)



(a) (b)

Figura 5. Gráfico força (kN) versus deformação (%) das geogrelhas modelo Huesker: (a) para PET virgem e (b) PET reciclado.

5 CONCLUSÃO

Diante do aumento anual da produção de plásticos, reforça-se a necessidade da adoção de alternativas para a utilização de resíduos pós-consumo. Assim, a utilização das garrafas PET como matéria-prima no processo de impressão 3D pode contribuir para a sustentabilidade na engenharia.

As variações nos resultados das geogrelhas de PET reciclado, provavelmente, são devidas à variabilidade inerente às qualidades dos materiais reciclados, à degradação natural do polímero com cada ciclo de processamento, entre outros. Entre os modelos de PET virgem, tais comportamentos podem estar associados à variabilidade das amostras produzidas e, provavelmente, ao processo de preparação das amostras de geogrelhas para o ensaio (ajuste geogrelha-garra, quantidade de cola, dimensão do geossintético de proteção às garras).

A aplicação de camadas de geossintéticos flexíveis utilizando cola quente, para a proteção no contato geogrelhas-garra, foi eficiente em evitar a ruptura no contato com geogrelha-garra. Para minimizar as variações nos resultados, recomenda-se que o geossintético flexível aplicado no contato geogrelhas-garra seja do mesmo tipo e lote, além disso, que sejam todos cortados exatamente nas mesmas dimensões e uma mesma quantidade de cola seja aplicada para sua fixação.

As geogrelhas apresentam diferentes configurações e níveis de resistência, por serem desenvolvidas para atender diferentes aplicações. Com a modificação dos modelos utilizados (Tensar SS20 e Huesker

200T) para um modelo de produção aditivo (impressão 3D), e a utilização de PET virgem e reciclado, foi observado no ensaio que as geogrelhas produzidas não alcançaram as resistências mínimas dos fabricantes (20 kN/m), apesar das geogrelhas do modelo Huesker em PET virgem terem atingido valores de resistência bastante próximos (média de 16,81 kN/m). De forma geral, o modelo de geogrelhas baseado na Huesker 200T apresentou maiores resistências à tração que o modelo baseado na Tensar SS20. A resistência das geogrelhas de PET reciclado atingiu apenas 25% da resistência das geogrelhas de PET virgem.

Uma das possibilidades para a viabilização das geogrelhas de PET reciclado seria o aumento da qualidade do filamento reciclado, além disso, a modificação do modelo 3D das geogrelhas, com o aumento das dimensões das faixas das geogrelhas, poderia aumentar o desempenho.

Conclui-se que a reciclagem de garrafas PET em geogrelhas representa uma forma de transformar esse resíduo em uma solução geotécnica, porém, estudos adicionais são necessários. Por outro lado, foi observado melhor desempenho das geogrelhas de PET virgem, com potencial para a aplicação em obras de pequeno porte com menores solicitações. Além disso, são recomendados estudos complementares, como os realizados por Vicuña et al. (2024), envolvendo a análise de diferentes configurações geométricas, com o objetivo de otimizar as propriedades das geogrelhas produzidas com materiais reciclados e ampliar sua aplicabilidade.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem à Maccaferri Brasil pela disponibilização do laboratório e aos engenheiros Jaime Duran, Jorge Silva e Júlia Fernandes Approbato, que proporcionaram a realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira De Normas Técnicas (2013). NBR – 9862. *Geossintéticos — Amostragem e preparação de corpos de prova para ensaios.*

Associação Brasileira De Normas Técnica (2013). NBR – 10319. *Geossintéticos - Ensaio de tração faixa larga.*

GILENO, A., TURCI, L. R. (2021) Life cycle assessment for PET-bottle recycling in Brazil: B2B and B2F routes. Cleaner Environmental Systems, v. 3, p. 100057, 2021

HASHEMINEZHAD, A et al. (2025) Evaluation of 3D-printed model geogrids and composite geosynthetics made from recycled plastics: Bridging laboratory insights with field performance. *Construction and Building Materials*, v. 465, p. 140258, 2025.

HASHEMINEZHAD, A et al. (2026) Field performance of recycled and virgin plastic composite geosynthetics in gravel roads: Moisture mitigation and structural benefits. *Transportation Geotechnics*, v 56, p 101841, 2026

HUESKER. (2014) *Fortrac Geosynthetics: Fortrac T and R-T Geogrids*. Versão 3, Gescher, Germany, 2014.

HUESKER. *Product Overview Geosynthetics*. Gescher, Germany, 2023

STATISTA. *Market Volume of Polyethylene Terephthalate Worldwide from 2015 to 2022, with a Forecast for 2023 to 2030*. 2024. Disponível em: < https://www.statista.com/ statistics/1245264/polyethylene-terephthalate-market-volume-worldwide/./>. Acesso em: 27 abril 2025.

TENSAR. (2019) *Tensar SS Geogrids Product Specifications*. Blackburn, Reino Unido, 2019

TYLMAN, I., DZIEEŻEK, K. (2020) Filament for a 3D Printer from Pet Bottles Simple Machine. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research* Vol. 9, No. 10, Oct. 2020

VICUÑA, L. et al. (2024) Evaluation of the Effectiveness of Geogrids Manufactured from Recycled Plastics for Slope Stabilization—A Case Study. *Polymers*, 2024, 16, 1151.