

Avaliação da Adição de Pó de PET em um Solo Argiloso para Aplicação em Pavimentação

Leonardo de Novais Mendes

Engenheiro Civil, Itaipu Engenharia, Campo Mourão, Brasil, leonardonovaismendes@gmail.com

Ewerton Clayton Alves da Fonseca

Professor, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Brasil, ewertonfonseca@utfpr.edu.br

RESUMO: A atuação profissional pautada nos princípios da preservação ambiental e do desenvolvimento sustentável é algo muito discutido no ramo da Engenharia Civil, em nível mundial. No Brasil, a problemática relacionada com a geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) permanece preocupante. Mais de 80 milhões de toneladas de RSU, por ano, foram gerados em 2021 e 2022. Apesar de a cobertura de coleta de RSU, no Brasil, em 2022, ter sido praticamente igual a 93%, nem todas as regiões do país possuem cobertura igual ou superior à média nacional. Além disso, 39% do montante coletado mencionado acima, continuam sendo dispostos inadequadamente em lixões e aterros controlados. Mesmo com a retomada da reciclagem de embalagens de polietileno tereftalato (PET), esse tipo de plástico ainda está contido no material que tem destinação inadequada. Diante do cenário supramencionado, este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento mecânico de compósitos constituídos de solo argiloso mais pó de PET, com teores de plástico iguais a 5%, 7% e 9%, a fim de verificar a possibilidade de sua utilização como reforço de subleito em pavimentos. Para isso, foram realizados ensaios de caracterização com o solo residual do basalto, típico no município de Campo Mourão, PR, mas também ensaios de compactação e de Índice de Suporte Califórnia (ISC), com o objetivo de comparar os parâmetros de umidade ótima, massa específica aparente seca máxima, capacidade de suporte e expansão do solo natural com os dos compósitos com diferentes teores de adição de pó de PET. Nos ensaios de compactação, notou-se o aumento da massa específica aparente seca máxima e a diminuição do teor de umidade ótimo, para todos os compósitos avaliados. Nos ensaios de ISC, o aumento na capacidade de suporte e a redução da expansão foram proporcionais à quantidade de plástico nos compósitos. Portanto, os resultados dos testes realizados sugerem que esse tipo de compósito tem potencial para ser empregado como camada de reforço de subleito em pavimentos, levando-se em consideração as condições dos ensaios executados no presente trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Solo Argiloso; Pó de PET; Compactação; Pavimentação; Sustentabilidade.

ABSTRACT: Professional performance based on the principles of environmental preservation and sustainable development is something that is widely considered in the field of Civil Engineering, worldwide. In Brazil, the problem related to the generation of Urban Solid Waste (USW) remains worrying. More than 80 million tons of USW per year were generated in 2021 and 2022. Although USW collection coverage in Brazil in 2022 was practically equal to 93%, not all regions of the country have coverage equal to or greater than the national average. Furthermore, 39% of the amount collected mentioned above continues to be inappropriately disposed of in controlled dumps and landfills. Even with the resumption of recycling of polyethylene terephthalate (PET) packaging, this type of plastic is still contained in the material that is inappropriately disposed of. Given the aforementioned scenario, this work aimed to evaluate the mechanical behavior of composites made up of clayey soil plus PET powder, with plastic contents equal to 5%, 7% and 9%, in order to verify the possibility of their use as subgrade reinforcement in pavements. To this end, characterization tests were carried out with residual basalt soil, typical in the municipality of Campo Mourão, PR, but also compaction and California Bearing Ratio (CBR) tests, with the aim of comparing the optimum moisture content parameters, maximum dry unit mass, bearing capacity and expansion of natural soil with those of composites with different levels of addition of PET powder. In the compaction tests, an increase in the maximum dry unit mass and a decrease in the optimum moisture content were noted for all the composites evaluated. In CBR tests, the increase in bearing capacity and reduction in expansion were

proportional to the amount of plastic in the composites. Therefore, the results of the tests carried out suggest that this type of composite has the potential to be used as a subgrade reinforcement layer in pavements, taking into account the conditions of the tests carried out in this work.

KEYWORDS: Clayey Soil; PET Powder; Compaction; Paving; Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

Apesar do desenvolvimento tecnológico permanecer em avanço muito acelerado nos últimos anos, algumas vezes, as soluções para problemas reconhecidamente muito sérios, como é o caso da gestão de resíduos sólidos, parecem não acompanhar tal desenvolvimento (Guitarrara, 2023). Portanto, um grande desafio na área das Engenharias, atualmente, tem sido atrelar os desenvolvimentos, tecnológico e sustentável.

No Brasil, o problema relacionado com a geração de RSU segue preocupante. Mais de 80 milhões de toneladas de RSU, por ano, foram gerados em 2021 e 2022. Apesar de a cobertura de coleta de RSU, no Brasil, em 2022, ter sido praticamente igual a 93%, nem todas as regiões do país possuem cobertura igual ou superior à média nacional. Além disso, 39% do montante coletado mencionado acima, continuam sendo dispostos de modo inadequado em lixões e aterros controlados (ABRELPE, 2023).

Mesmo com a retomada da reciclagem de embalagens de polietileno tereftalato (PET), esse tipo de plástico ainda está contido no material que tem destinação inadequada. Com relação a isso, o 12º censo da reciclagem do PET revelou que o Brasil reciclou apenas 56,4% das embalagens desse tipo de produto, das 637 mil toneladas de embalagens descartadas em 2021 (ABIPET, 2022).

A indústria da construção civil, por ser um dos ramos que mais gera resíduos, assume papel de atividade sustentável quando incorpora resíduos aos materiais de construção (Metha, 2001). Diversas são as pesquisas atuais que estudam os benefícios que os diferentes materiais descartados, de forma inadequada, podem oferecer às Engenharias. Dentre esses destaca-se a reutilização de resíduos sólidos, os quais são amplamente empregados na construção civil.

Nesse contexto, objetivando-se contribuir na redução do descarte inadequado de plásticos, este trabalho investigou os efeitos da adição de distintas quantidades de pó de PET no solo argiloso, típico no município de Campo Mourão, PR, de modo a avaliar os comportamentos desses novos materiais em pavimentos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O solo residual do basalto, típico no município de Campo Mourão, PR, foi empregado nos ensaios. Trata-se de um material argiloso, do grupo A-7 (sistema da *American Association of State Highway and Transportation Officials* - AASHTO), em que pelo menos 85% do material passam pela abertura da malha da peneira de nº 200 e pelo menos 50% possuem diâmetros equivalentes menores que 2 μm (Batelo, 2019 e Mendes, 2023). As principais características geotécnicas desse solo são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características geotécnicas do solo local empregado nos ensaios (Mendes, 2023).

Parâmetro	Valor	Unidade de medida	Norma empregada
w_L	52	%	NBR 6459 (ABNT, 2016-a)
w_p	30	%	NBR 7180 (ABNT, 2016-b)
IP	22	%	
ρ_s	2,97	g/cm^3	NBR 6458 (ABNT, 2016-c)
$w_{ót.}$	28,1	%	NBR 7182 (ABNT, 2016-d)
$\rho_{d,máx.}$	1,52	g/cm^3	
ISC	~20	%	
expansão	<1	%	NBR 9895 (ABNT, 2016-e)

A massa específica dos sólidos que constituem esse solo é da ordem de $3,00 \text{ g/cm}^3$, devido a presença significativa de óxido de ferro (solo de coloração vermelha) e os parâmetros de compactação desse solo, considerando-se a energia normal (no cilindro de ISC), são aproximadamente, 30% (teor de umidade ótimo) e $1,50 \text{ g/cm}^3$ (massa específica aparente seca máxima). O Índice de Suporte Califórnia (ISC) desse material é aproximadamente 20,0% e a sua expansão é menor do que 1,0%.

O pó de PET utilizado neste trabalho (MP-05) foi obtido por meio de doação de uma empresa com sede em Mauá, SP. Tal material é obtido mediante micronização do polietileno tereftalato, o que faz com que sua granulometria seja muito fina, isto é, 90% de suas partículas possuem diâmetros equivalentes maiores que $0,006 \mu\text{m}$ e menores do que $0,180 \mu\text{m}$. Trata-se de um plástico de engenharia que possui elevada resistência à água, sendo portanto, um material hidrofóbico. A coloração desse material é cinza claro.

2.2 Métodos

Neste trabalho, compósitos (solo argiloso + plástico) com teores, em massa, de 5%, 7% e 9% de pó de PET foram estudados. Esses teores foram definidos com o objetivo de complementar parte da pesquisa realizada por Thomas *et al.* (2019), na qual compósitos com 1%, 3% e 5% de PET, em pó e em flocos, foram submetidos ao ensaio de compactação. No caso deste trabalho, os compósitos foram submetidos aos ensaios de compactação e de ISC. A Figura 1 mostra um dos compósitos (solo argiloso + pó de PET) empregado neste trabalho.



Figura 1. Aspecto de um dos compósitos usado neste trabalho.

3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Ensaio de compactação

A Figura 2 apresenta os gráficos correlatos às curvas de compactação para diferentes tipos de materiais, a saber: solo de referência (sem a adição de plástico), compósito I (5% de plástico), compósito II (7% de plástico) e compósito III (9% de plástico). Adicionalmente, são apresentadas a curva de saturação ($S = 100\%$) e a curva correspondente a igual grau de saturação ($S = 89\%$), ambas para a condição de referência.

Pode-se observar que na medida em que o pó de PET foi adicionado ao solo argiloso local, a massa e o volume de sólidos aumentaram. Tais aumentos foram, aproximadamente, da mesma ordem de grandeza dos percentuais de plástico adicionados (6,0%, 7,2% e 9,6%). Além disso, quanto mais plástico foi adicionado ao solo local, maior foi a massa específica aparente seca máxima e menor foi o teor de umidade ótimo obtidos. Para o compósito III, por exemplo, houve aumento de 8,6% na massa específica aparente seca máxima e redução de 12,8% na umidade ótima. A interação físico-química entre os sólidos envolvidos proporcionou o aumento da massa de sólidos por unidade de volume.

Uma vez que a massa específica dos sólidos que constituem o pó de PET é maior do que a massa específica da água, a massa específica aparente seca máxima tende a aumentar se o plástico adicionado ao solo local passar a ocupar os poros formados pelas partículas sólidas que constituem esse material, os quais antes da inserção de plástico eram ocupados por água ou ar. Isso é possível tendo em vista a granulometria do pó de PET empregado e seus altos teores adotados neste trabalho. O fato de o plástico de engenharia ser hidrofóbico fez com que a interação dos compósitos com a água diminuísse, o que justifica a redução dos teores de umidade ótimos.

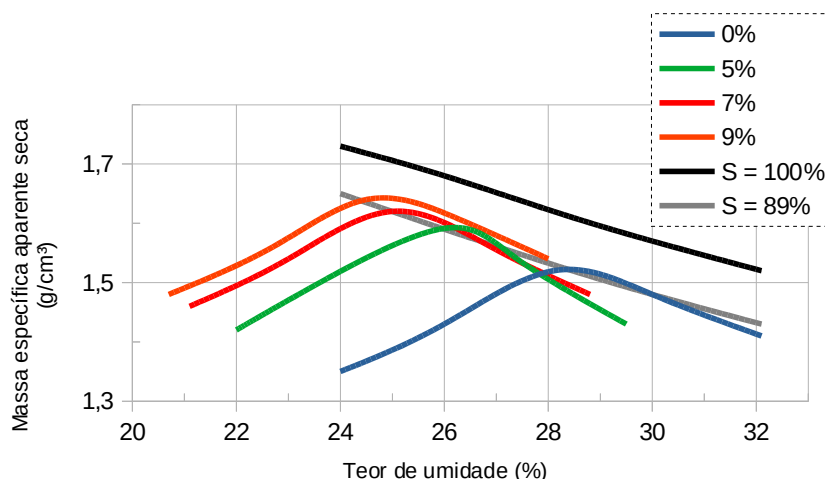


Figura 2. Resultados dos ensaios de compactação.

Os resultados obtidos por Thomas *et al.* (2019) divergem dos resultados obtidos neste trabalho. É possível que as diferenças observadas estejam associadas com o fato de os pós de PET empregados nos trabalhos serem significativamente diferentes. O pó de PET empregado por Thomas *et al.* (2019) possuía granulometria bem mais granular (0% de finos, de acordo com o Sistema Unificado para Classificação de Solos - SUCS) do que o plástico de engenharia usado neste estudo. Portanto, a depender das características geotécnicas do plástico inserido no solo, os comportamentos podem ser muito diferentes.

É importante notar, ainda na Figura 2, que os efeitos da adição de pó de PET no solo argiloso local apresentaram comportamento semelhante àquele observado quando se aumenta a energia de compactação. Isto é, quando o teor de umidade é inferior ao teor de água ótimo, o aumento na energia de compactação proporciona o aumento na massa específica aparente seca e, do contrário, o incremento na energia pouco ou nada interfere na massa específica já mencionada. Portanto, quanto maior for a energia de compactação maior será a massa específica aparente seca máxima e menor será a umidade ótima obtida.

De acordo com Pinto (2006), para um mesmo solo, os pontos correspondentes à máxima massa específica aparente seca e teor de umidade ótimo, para distintas energias de compactação, estão localizados ao longo de uma curva que possui aspecto semelhante ao de uma curva correspondente a igual grau de saturação. Na Figura 2 é possível visualizar essa curva para o estudo em questão, apesar de os compósitos já não corresponderem ao solo argiloso local. Essa curva corresponde a um grau de saturação aproximadamente igual a 89%.

Portanto, os resultados sugerem que a adição do tipo de PET empregado nesta pesquisa ao solo argiloso local, teve efeito equivalente a se aumentar a energia de compactação, isto é, melhorar a capacidade de compactação do solo local. A afirmação anterior só é válida, desde que considere-se que os pontos correspondentes à máxima massa específica aparente seca e teor de umidade ótimo, para os distintos teores de pó de PET adicionados ao solo de Campo Mourão, estejam também localizados ao longo de uma curva que possui aspecto semelhante ao de uma curva correspondente a igual grau de saturação.

A Figura 3 mostra a variação dos pontos de máxima massa específica aparente seca em função dos teores de pó de PET empregados neste trabalho. Nota-se que há uma evidente tendência para a estabilização do valor de massa específica aparente seca máxima com o aumento do teor de pó de PET adicionado ao solo. Mais estudos similares a este são importantes e necessários para se determinar o que acontece com a massa específica aparente seca máxima para teores de pó de PET maiores do que 9% e para qual teor desse tipo de pó de PET há a estabilização no valor da massa específica aparente seca máxima.

Os resultados apresentados com respeito à compactação dos compósitos investigados neste trabalho sugerem a melhoria no processo de densificação do solo argiloso típico no município de Campo Mourão, PR, a partir da inserção de plástico de engenharia ao solo local.

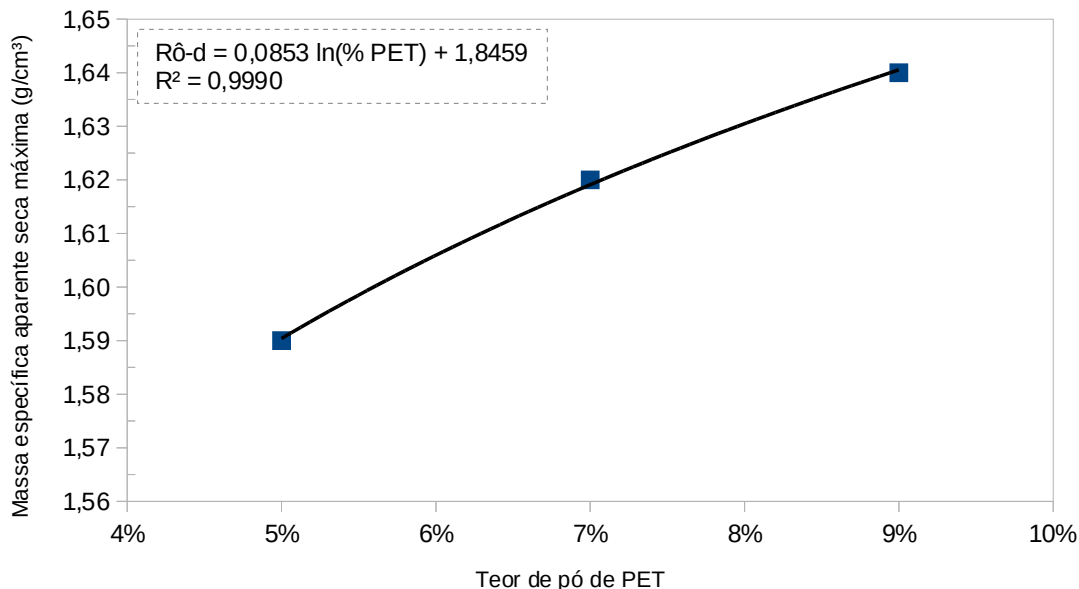


Figura 3. Variação da massa específica aparente seca máxima em função do percentual de PET adicionado ao solo argiloso local.

No que diz respeito ao caráter sustentável deste artigo, podem ser citados os seguintes pontos: o uso de um resíduo abundante na natureza, quando inserido em certas proporções a um dado solo natural, pode melhorar o comportamento desse material; para a ocorrência dessa melhoria há necessidade do uso de menos água no processo de compactação; além disso, para se atingir tal melhoria não se faz necessário aumentar a energia de compactação, o que demandaria maior consumo de combustíveis fósseis para a realização do serviço de engenharia e que, por sua vez, aumentaria emissões que são prejudiciais ao meio ambiente.

3.2 Ensaios de ISC

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos na fase de expansão dos distintos compósitos investigados nesta pesquisa, cada um deles inicialmente compactado na sua respectiva unidade ótima. É apresentado também o resultado obtido para o solo argiloso local, sem adição alguma de plástico (ensaio de referência).

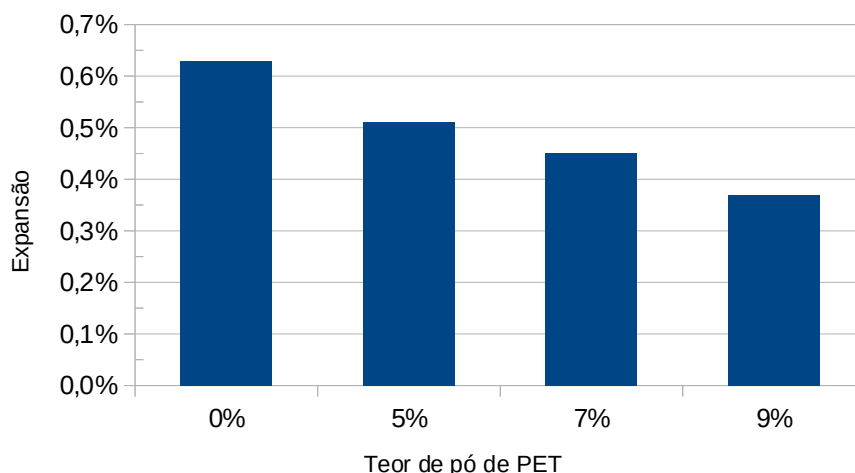


Figura 4. Expansão dos distintos materiais estudados.

Observa-se que quanto maior foi a quantidade de plástico inserida no solo local, menos expansão ocorreu. Notam-se diminuições de 19,0%, 28,6% e 41,3% para os compósitos I, II e III, respectivamente, quando feita a comparação com a expansão medida no ensaio de referência. Isso se deve, provavelmente, à maior resistência dos compósitos em relação ao solo argiloso local (sem a adição de plástico). O incremento de massa específica aparente seca máxima observado nos ensaios de compactação justifica tal comportamento, uma vez que houve a diminuição do índice de vazios por conta das inclusões de plástico de engenharia no solo local, o qual passou a ocupar os poros antes ocupados com água ou ar.

Isso acarreta, possivelmente, maior estabilidade das cargas elétricas entre os materiais e mais contatos interagregados que fazem com que os espaços vazios fiquem menores, o que por sua vez dificulta a absorção de água pelos compósitos e, conseqüentemente, reduz as expansões dos mesmos.

A Figura 5 apresenta os resultados obtidos na fase de penetração do pistão nos distintos compósitos investigados nesta pesquisa, após a fase de expansão mencionada anteriormente. Além disso, é apresentado o resultado obtido a partir da execução do ensaio de referência (sem a adição de plástico).

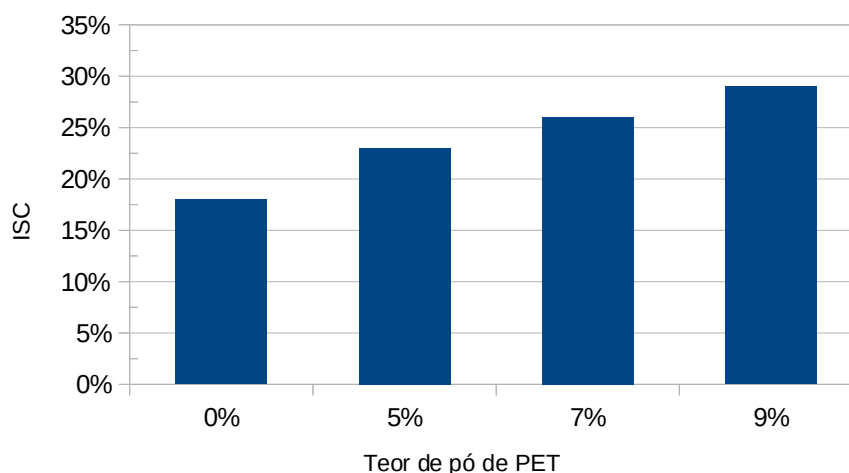


Figura 5. ISC dos distintos materiais investigados.

Nota-se o aumento significativo nas resistências à penetração do pistão em todos os compósitos examinados neste trabalho. O compósito III foi o que apresentou maior incremento de resistência (61,1%) em relação ao ensaio de referência. Esses ganhos de resistência já eram esperados em virtude dos resultados obtidos com os ensaios de compactação já relatados.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de ISC, em relação à aplicação dos compósitos em camadas de subleito ou reforço de subleito, sugerem que eles podem ser utilizados nesse contexto, uma vez que as diretrizes estabelecidas pela ES-138 (DNIT, 2010) foram atendidas em sua totalidade.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou o comportamento mecânico de compósitos constituídos de solo argiloso mais pó de PET, com teores de plástico iguais a 5%, 7% e 9%, a fim de verificar a possibilidade de sua utilização como reforço de subleito em pavimentos. Para as condições dos ensaios realizados, as principais conclusões estão sumariadas a seguir:

- * a inclusão de pó de PET no solo argiloso local atuou diretamente nos valores de massa específica aparente seca e teor de umidade, observados nos ensaios de compactação realizados. Notou-se aumento significativo nos valores da massa específica aparente seca máxima e diminuição do teor de umidade ótimo, em todos os compósitos investigados, quando comparados com os valores de referência (solo local sem adição de plástico);
- * o aumento da massa específica aparente seca máxima está relacionado com o fato de as partículas de pó de PET preencherem os poros formados pelo entrosamento das partículas que constituem o solo

local, já que o plástico adicionado ao solo é mais fino que o solo argiloso. A redução na umidade ótima está relacionada com o fato do plástico ser hidrofóbico;

- * apesar de a massa específica das partículas que constituem o plástico de engenharia ser inferior à massa específica das partículas que constituem o solo argiloso, todas as inclusões de pó de PET investigadas neste trabalho resultaram no aumento da massa específica aparente seca máxima dos compósitos examinados. Isso possivelmente tem ligação com os altos teores de plástico adicionados e investigados neste trabalho, em comparação com os teores empregados por Thomas *et al.* (2019), o que pode também explicar as divergências de resultados observadas entre os trabalhos;
- * os resultados obtidos sugerem que a adição do tipo de pó de PET empregado nos ensaios pode proporcionar melhoria de comportamento semelhante aos efeitos que são observados quando do aumento da energia de compactação em solos;
- * no que diz respeito à sustentabilidade, este artigo destaca: o uso de um resíduo abundante na natureza sendo capaz de proporcionar melhoria no comportamento de um solo natural, quando devidamente adicionado a esse; a necessidade do uso de menos água para a ocorrência dessa melhoria; e a menor demanda por combustíveis fósseis para a realização do serviço de engenharia, já que não há necessidade de aumentar a energia de compactação para proporcionar ganho de resistência aos compósitos;
- * os resultados dos ensaios ISC mostraram que a inserção de pó de PET no solo argiloso local também aumentou a capacidade de suporte e diminuiu a expansão. Provavelmente, o incremento na massa específica aparente seca máxima obtido via compactação resultou na redução do índice de vazios e, portanto, na menor concentração de água nos poros, de modo a diminuir a expansão dos compósitos. O fato de o plástico ser hidrofóbico reforça esta afirmação;
- * os resultados obtidos nesta pesquisa sugerem que os compósitos examinados podem ser empregados como reforço de subleito, já que todos eles apresentaram capacidades de suporte superiores ao do solo de referência (sem a adição de plástico), assim como expansões inferiores a 1,0%.
- * a realização de mais ensaios, similares aos que foram feitos nesta pesquisa, são considerados relevantes para melhorar o entendimento correlato aos comportamentos dos compósitos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às seguintes instituições, que contribuíram de diferentes formas para a realização do programa experimental descrito neste artigo: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* Campo Mourão, Itaipu Engenharia (laboratório de Geotecnia) e empresa fornecedora do plástico de engenharia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIPET – Associação Brasileira da Indústria do PET. *12º Censo da Reciclagem de PET no Brasil*, 2022. Disponível em: <https://abipet.org.br/wp-content/uploads/2022/12/Infografico_12_Censo_da_Reciclagem_no_Brasil-Novembro_2022.pdf>. Acesso em: 13 mai. 2023.
- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*, 2023. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama-2023/>>. Acesso em: 13 mai. 2023.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016-c). NBR 6458. *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8mm: determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016-a). NBR 6459. *Solo: determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016-b). NBR 7180. *Solo: determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016-d). NBR 7182. *Solo: ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016-e). NBR 9895. *Solo: índice de suporte califórnia - método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Batelo, L.C.E. (2019). *Estudo das características físicas de um solo de Campo Mourão por meio de ensaios de laboratório*. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Civil, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná / UTFPR-CM, 90 p.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 138/2010 – ES. *Pavimentação – reforço do subleito - especificação de serviço*. Rio de Janeiro.
- Guitarrara, P. Desenvolvimento sustentável. *Brasil Escola*. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/desenvolvimento-sustentavel.htm>. Acesso em: 13 mai. 2022.
- Mendes, L.N. (2023). *Efeito da adição de pó de PET em um solo argiloso para aplicação em pavimentação*. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Civil, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná / UTFPR-CM, 57 p.
- Metha, P.K. (2001). Reducing the environment impact of concrete: concrete can be durable and environmentally friendly. *Concrete International*, v. 10, p. 61-66. Disponível em: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&ID=10735>. Acesso em: 10 jul. 2023.
- Pinto, C.S. (2006). *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*, 3. ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil, 367 p.
- Thomas, M.; Hartmann, D.A; Kostascki, L.E; Garcia, A.P. Análise da influência da adição de resíduos de PET em floco e em pó na curva de compactação de um solo argiloso. In: VIII Congresso Brasileiro de Geossintéticos (Geossintéticos 2019), São Carlos. *Anais... ABMS*. v. 1, p. 427-434.