

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/799

Avaliação da Resistência à Compressão Simples de Misturas de Solo-Cimento com Substituição Parcial do Cimento por Micro PET

Mateus Teixeira Crippa
UEL, Londrina, Brasil, mateus.teixeira@uel.br

Alana Dias de Oliveira
UTFPR, Toledo, Brasil, alanaoliverira@utfpr.edu.br

Alex Morin Carneiro
UEL, Londrina, Brasil, alex.morin.carneiro@uel.br

José Wilson dos Santos Ferreira
UnB, Brasília, Brasil, jose.wilson@unb.br

Raquel Souza Teixeira
UEL, Londrina, Brasil, raquel@uel.br

RESUMO: A técnica de estabilização de solos com a adição de cimento tem sido uma prática comum no Brasil por décadas. Esse método, frequentemente associado a grandes volumes de material, é empregado em diversos contextos, como na estabilização de camadas de base de pavimentos. No entanto, a produção de cimento convencional emite grandes quantidades de CO₂ na atmosfera, portanto, na contramão da sustentabilidade. Diante deste cenário, o presente artigo busca uma alternativa para reduzir o consumo de cimento nas misturas ao introduzir um agente físico derivado de um resíduo, o micro PET, um microplástico de difícil reciclagem e notório poluente ambiental. O estudo avaliou a resistência à compressão simples (RCS) de misturas de solo-cimento com substituição parcial do material cimentício por micro PET. Para isto, foram realizados ensaios de compressão simples em misturas compactadas na Energia Normal de Proctor, fixando o teor de cimento em 8 % e variando as substituições em 30 %, 50 % e 70 % da massa de cimento pelo micro PET. Apesar da redução da resistência à compressão observada para as misturas ensaiadas, os resultados mostraram viabilidade na aplicação das misturas de solo-cimento-PET em camadas de bases de pavimentos para o teor de substituição de 30 %, cuja resistência à compressão foi superior ao mínimo de 2100 kPa exigido por norma. Tais descobertas apontam para a viabilidade do uso do resíduo em soluções técnicas, impulsionando práticas sustentáveis na engenharia.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilização; Misturas; Solo-cimento; PET; Comportamento mecânico.

ABSTRACT: The technique of soil stabilization with the addition of cement has been a common practice in Brazil for decades. This method, often associated with large volumes of material, is employed in various contexts, such as in the stabilization of pavement base layers. Conventional cement production emits large amounts of CO₂ into the atmosphere, contradicting sustainability efforts. The present article seeks an alternative to reduce cement consumption in mixtures by introducing a physical agent derived from waste, micro-PET, a microplastic that is difficult to recycle and a notorious environmental pollutant. The study evaluated the unconfined compressive strength (UCS) of soil-cement mixtures with partial replacement of the cementitious material by micro-PET. For this purpose, unconfined compression tests were performed on mixtures compacted with Normal Proctor Energy, fixing the cement content at 8 % and varying the substitutions at 30 %, 50 %, and 70 % of the cement mass with micro-PET. Despite the reduction in compressive strength observed for the tested mixtures, the results showed feasibility in the application of soil-cement-PET mixtures in pavement base layers for the 30 % substitution, whose compressive strength exceeded the minimum of 2100 kPa required by standards. These findings demonstrate the feasibility of using waste in technical solutions, promoting sustainable practices in engineering.

KEYWORDS: Stabilization; Mixtures; Soil-cement; PET; Mechanical behavior.

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento do mercado da construção civil e a crescente preocupação com a sustentabilidade, a Geotecnia vem se mostrando uma área promissora para aplicações de materiais alternativos, incluindo aqueles de elevado tempo de degradação na natureza, como os resíduos plásticos, por exemplo. Essa conexão ganha relevância diante do relatório publicado em 2019 pela WWF (*World Wildlife Fund*), que aponta que aproximadamente um terço de todo plástico já produzido tenha se tornado um poluente ambiental (Wit *et al.*, 2019).

Segundo Romão *et al.* (2009), por possuir um baixo custo de produção e excelente relação entre suas propriedades mecânicas e térmicas, o PET (Polietileno Tereftalato) é um dos termoplásticos mais produzidos no mundo. O micro PET é um resíduo obtido após o processo de moagem das garrafas PET nos centros de reciclagem. Possui granulometria fina e, por isso, é frequentemente classificado como um microplástico, dificultando o retorno deste subproduto para a cadeia produtiva. Por este motivo, autores vêm estudando o comportamento e propriedades de misturas de solo e micro PET, como material alternativo na estabilização física de solos.

Louzada (2015) avaliou o comportamento mecânico de misturas de PET de fina granulometria (<0,42 mm) em dois diferentes solos, um arenoso e outro argiloso, por meio de ensaios triaxiais, constatando melhora dos parâmetros de resistência para ambos os solos, em um teor de adição de PET considerado ideal. Carvalho (2019) também avaliou a possibilidade de utilização deste resíduo como material alternativo em base de pavimentos, pelo estudo do módulo de resiliência e comportamento mecânico dos compósitos, constatando aumento na rigidez do solo e aumento do módulo de resiliência para baixos teores de adição do PET.

A adição de cimento ao solo, uma técnica de estabilização química de solos amplamente empregada no Brasil, principalmente na área de pavimentação, melhora a interação entre as partículas do solo, elevando sua coesão e, conseqüentemente, melhorando sua capacidade de carga. Metzker *et al.* (2022) avaliou a resistência à compressão e durabilidade de tijolos de solo-cimento e PET, com granulometria das partículas entre 0,64 mm e 0,25 mm, constatando melhora em ambas propriedades para misturas com 1,5% de adição de micro PET.

A técnica de solo-cimento, no entanto, geralmente associada a grandes volumes de material, confronta princípios de sustentabilidade devido ao grande consumo de cimento, cuja a indústria é responsável por cerca de 5% das emissões CO₂ na atmosfera do planeta (Barbalho *et al.*, 2020). A produção do cimento Portland comum, contendo > 90% de clínquer, gera, em média, 842 kg de CO₂ por tonelada de clínquer produzido (Scrivener *et al.*, 2018).

Tendo em vista os desafios identificados, este estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade de substituir parcialmente o cimento pelo micro PET nas misturas de solo-cimento, analisando os efeitos gerados por diferentes teores de substituição no comportamento mecânico do solo. Para isto, foram realizados ensaios de compressão simples em misturas compactadas na Energia Normal de Proctor, fixando o teor de cimento em 8% e variando as substituições em 30 %, 50 % e 70 % da massa de cimento pelo micro PET.

Esta abordagem almeja, por meio da combinação da técnica de solo-cimento e da inserção de um elemento de reforço físico, com o micro PET, obter um material compósito sustentável de comportamento mecânico satisfatório para possível utilização em camadas de base de pavimentos. A combinação destes materiais busca mitigar as emissões de CO₂ associadas à produção do cimento convencional e agregar maior valor ao micro PET, cujas aplicações na Engenharia são atualmente limitadas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O solo empregado nos ensaios provém do município de Mandaguaçu-PR. Classificado pelo sistema SUCS como areia argilosa (SC), esse material possui massa específica dos grãos igual a 2,73 g/cm³, com predominância de quartzo em sua composição mineralógica, condizente com a predominância da fração areia em sua granulometria (aproximadamente 71 %), enquanto as frações de silte e argila representam, respectivamente, 15,5 % e 13,5 % (Gonçalves *et al.*, 2018). Foi realizada a caracterização granulométrica do solo de acordo com o prescrito na NBR 7181 (ABNT, 2016).

O material cimentício utilizado neste trabalho foi o cimento Portland CP II Z-32 com adição de pozolana e resistência superior a 32 MPa após 28 dias de cura. Esta escolha deve-se aos significativos ganhos de resistência nos primeiros 7 dias de cura e à sua comum disponibilidade na região. A mistura de solo-cimento foi fixada com teor de adição de 8%, adotando-o como referência para as análises de resistência nas misturas com substituição por micro PET.

O micro PET foi adquirido na PlastPET, um centro de reciclagem localizado na cidade de Maringá-PR. Para caracterização granulométrica do micro PET, por não possuir nenhuma normativa específica, utilizou-se da mesma normativa para solos, NBR 7181 (ABNT, 2016), realizando apenas a etapa de peneiramento fino, pois, devido ao baixo peso específico do material, não é possível realizar a etapa do ensaio de sedimentação.

2.2 Métodos

Com o objetivo de verificar o comportamento das misturas de solo-cimento-PET, frente ao solo natural e solo-cimento, foram definidos três teores de substituição abrangendo faixa ampla, a fim de avaliar o comportamento desse resíduo em condições distintas. A Tabela 1 resume os teores de substituição empregados, em relação a massa seca de cimento, bem como a nomenclatura dada para cada ensaio.

Tabela 1. Teores de substituição do cimento por micro PET nas misturas

Nomenclatura	Teor de substituição do cimento (%)	Cimento adicionado (%)	Micro PET adicionado (%)
Solo natural	0	0	0
Solo-cimento	0	8,0	0
Solo(70c/30PET)	30	5,6	2,4
Solo(50c/50PET)	50	4,0	4,0
Solo(30c/70PET)	70	2,4	5,6

2.2.1 Compactação

Os ensaios de compactação seguiram os preceitos da NBR 7182 (ABNT, 2016). Ferreira (2019) construiu a curva de compactação do solo de Mandaguaçu, bem como a curva de compactação deste solo com adição de 8% de CP II Z-32. O autor obteve valor de massa específica seca máxima de $1,87 \text{ g/cm}^3$ e teor de umidade ótima de 13,7 % para o solo natural e, para a mistura com cimento, de $1,89 \text{ g/cm}^3$ e teor de umidade ótima de 13,5 %. Os parâmetros adotados para os compósitos de solo-cimento-PET foram os mesmos das misturas de solo-cimento, dada a baixa quantidade de PET quando comparada aos outros componentes da matriz.

Com as amostras de solo devidamente secas, destorroadas e armazenadas com controle de umidade, foi realizada a moldagem dos corpos de prova a partir da compactação em cilindro com 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro, utilizando a Energia Normal de Proctor, e adotando como controle de compactação grau de compactação (GC) de $100 \% \pm 2 \%$ e variações de $\pm 0,5 \%$ do teor de umidade ótima.

2.2.2 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Os ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS) foram executados conforme a NBR 12025 (ABNT, 2012). Os ensaios de RCS foram realizados em triplicatas, englobando 15 corpos de prova, no mínimo. Os corpos de prova com adição de cimento permaneceram em câmara úmida por 7 dias para cura e, então, foram levados à prensa CBR – Marshall Automática para ruptura. A prensa é configurada para medir a curva tensão *versus* deformação até o pico, não fornecendo comportamento pós-pico. Para assegurar a uniformidade entre os resultados obtidos, adotou-se limite de 5 % no coeficiente de variação (CV) da tensão máxima obtida para cada mistura.

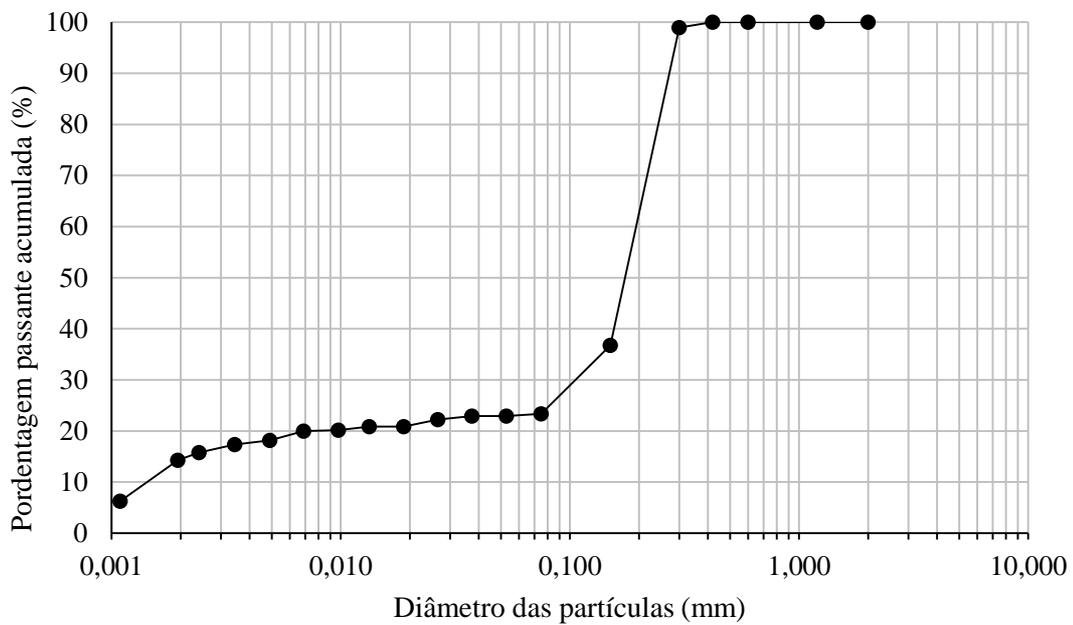
2.2.3 Energia de Deformação Absorvida

A Energia de Deformação Absorvida (E_{def}) pode ser definida como a tenacidade do material, ou seja, o quanto um material absorve de energia até sua ruptura. É determinada graficamente pela área sob a curva

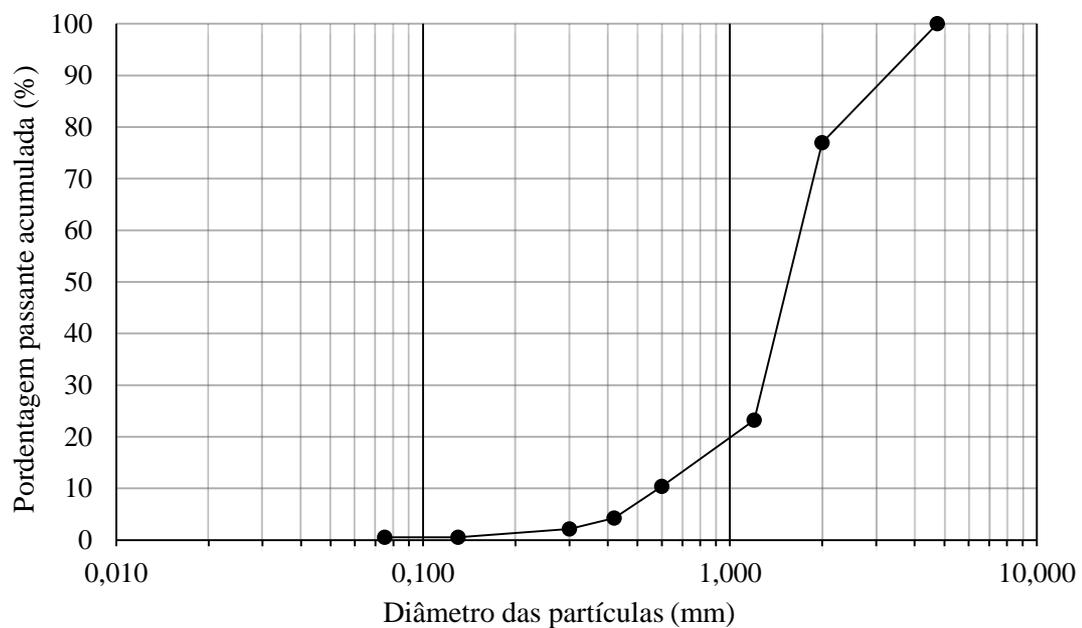
tensão-deformação. Com base nas curvas obtidas nos ensaios de resistência à compressão simples, determinou-se a E_{def} considerando-se a área da curva tensão vs deformação de cada material ensaiado até a deformação de 0,5 %.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1a apresenta a curva granulométrica do solo de Mandaguaçu, obtida por sedimentação com uso de defloculante e peneiramento, e a Figura 1b apresenta a curva granulométrica do micro PET, obtida por peneiramento.



(a)



(b)

Figura 1. Curvas granulométricas: a) Solo de Mandaguaçu; b) Micro PET

A Figura 2 mostra as frações granulométricas do PET retida cada peneira do ensaio de peneiramento. Observa-se que a maior concentração do material utilizado ficou retido na peneira de 1,2 mm. O material retido na peneira de 2 mm, primeira do processo de peneiramento, apresentou uma forma muito irregular, potencialmente afetando a integridade dos corpos de prova compactados. A fim de se evitar este problema e garantir maior padronização no material aplicado nas misturas, descartou-se todo o conteúdo retido nela.



Figura 2. Peneiramento do micro PET para granulometria

A Tabela 2 mostra os resultados de resistência à compressão simples obtidos para o solo natural compactado e compósitos (solo cimento e solo-cimento-PET), bem como os respectivos parâmetros estatísticos de desvio-padrão e coeficiente de variação (CV). Os baixos valores de CV demonstram elevada homogeneidade entre os corpos de prova ensaiados.

Tabela 2. Resultados de ensaio de resistência à compressão simples (RCS)

Identificação da amostra		Carga máxima (N)	Tensão (kPa)	Tensão média (kPa)	Desvio-padrão (kPa)	CV (%)
Solo	CP 01	667,08	339,39	334,40	10,78	0,3
	CP 02	627,84	319,43			
	CP 03	676,89	344,39			
Solo-cimento	CP 01	7884,6	4012,84	4016,93	49,91	1,2
	CP 02	7776,7	3857,94			
	CP 03	8012,0	4080,00			
Solo(70c/30PET)	CP 01	5532,8	2814,98	2666,91	105,20	3,9
	CP 02	5120,8	2605,35			
	CP 03	5071,8	2580,40			
Solo(50c/50PET)	CP 01	3355,0	1706,96	1725,26	72,48	4,2
	CP 02	3237,3	1647,06			
	CP 03	3580,7	1821,75			
Solo(30c/70PET)	CP 01	2148,4	1093,05	1080,57	12,65	1,2
	CP 02	2117,3	1078,32			
	CP 03	2099,3	1068,10			

A Figura 3 apresenta as curvas tensão *versus* deformação do solo e compósitos cujo valor de tensão chegou mais próximo da tensão média em cada ensaio. Ao comparar as curvas do solo natural e com adição de 8 % de cimento, nota-se que a presença do estabilizante químico atua de maneira extremamente eficaz quando combinado com o solo de Mandaguaçu, especialmente por se tratar de um solo cuja principal fração granulométrica é areia.

Ao comparar esse resultados com o comportamento das misturas de solo-cimento-PET, nota-se que a presença e o aumento na quantidade de PET produzem uma redução na RCS. Isto se deve a redução das reações de hidratação e cimentação responsáveis por produzir os incrementos de resistência. Ainda assim, todas as curvas de solo-cimento-PET obtidas demonstraram comportamento superior ao apresentado pelo solo natural compactado. Em especial, a substituição de 30% de cimento pelo micro PET, devido a predominância do agente químico, resulta em valor de resistência à compressão simples compatível com os critérios das normas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT 143 (2022) e Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná - DER-PR ES-P 11 (2018) para camadas de base e sub-base de pavimentação.

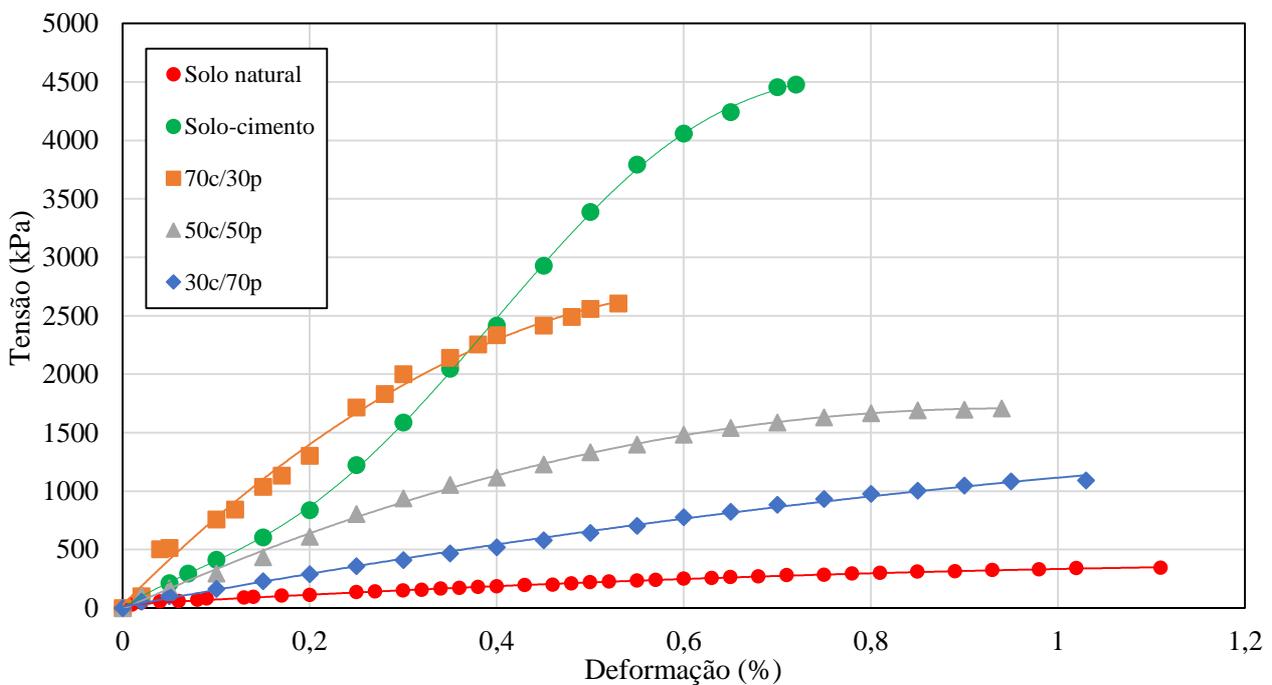


Figura 3. Curvas tensão vs deformação do solo e misturas de solo-cimento e solo-cimento-micro PET

Ainda sobre a Figura 3, observa-se que a presença do PET torna o compósito mais dúctil quando comparado à mistura de solo-cimento, fator positivo ao considerar o problema de fissuração precoce geralmente associado a misturas solo-cimento.

Pode-se notar que tanto a tensão média de ruptura de cada condição experimental quanto a Energia de Deformação Absorvida (ϵ_{def}) apresentaram a mesma tendência frente à substituição de cimento por PET (Figura 4). Com o aumento do teor de micro PET e, conseqüente, redução do teor de cimento, observou-se queda de resistência, uma vez que o PET atua como agente físico, diferentemente do cimento, cuja adição ao solo provocam reações de hidratação dos silicatos e aluminatos ali presentes, formando um gel que preenche parte dos vazios da massa e une as partículas adjacentes do solo, conferindo-lhe um aumento da resistência mecânica (Garcez, 2023).

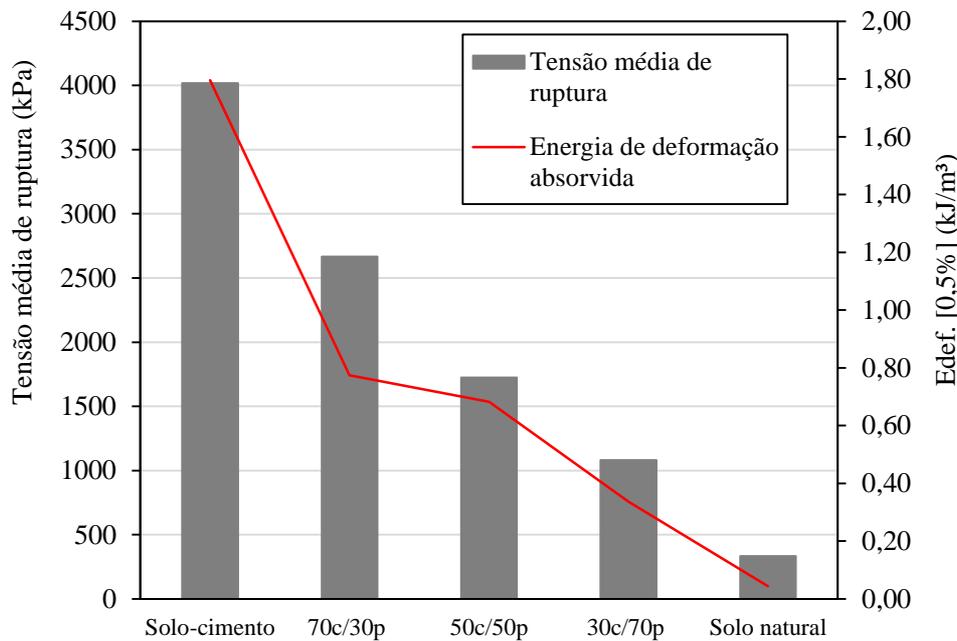


Figura 4. Tensão média de ruptura vs Energia de Deformação Absorvida

Apesar da queda de resistência, a mistura de solo-cimento com substituição de 30% do cimento pelo micro PET apresentou resistência à compressão acima de 2100 kPa com 7 dias de cura, estando dentro dos padrões aceitos pela norma DNIT 143-ES (DNIT, 2022), que trata da execução de camadas de base de pavimentos empregando misturas de solo e cimento. Tal fato indica aplicabilidade da solução proposta, mais sustentável pela redução do consumo de material cimentício das misturas e reuso de um resíduo de difícil reinserção na cadeia produtiva e de baixo custo.

Sobre as substituições de 50 % e 70 % de cimento por micro PET, dado o comportamento medido até o pico, é de se esperar que as misturas com maior teor de PET apresentem comportamento mais dúctil em comparação ao comportamento frágil típico das misturas solo-cimento. Pela queda significativa de resistência destas misturas, fica evidente a importância do agente químico na integração da matriz que gera efeito aglutinante nas partículas de solo, enquanto o PET, agente físico, não atua da mesma maneira, reduzindo a resistência da mistura. Vale ressaltar que a adição apenas do PET no solo não proporciona grandes ganhos de resistência, decorrendo da necessidade de avaliar o seu comportamento com estabilizantes químicos (Louzada, 2015; Carvalho, 2019; Thomas, 2019).

4 CONCLUSÕES

Tendo o propósito de avaliar a viabilidade de aplicação do resíduo de PET em misturas de solo-cimento, é possível concluir que a substituição parcial do cimento pelo micro PET leva a uma redução da resistência à compressão simples das misturas. Ainda assim, é possível empregar a mistura de solo-cimento-PET com substituição de 30% do material cimentício por micro PET em camadas de base e sub-base de pavimentos, a qual se situa acima da resistência mínima estabelecida por normas.

Observa-se tendência de comportamento dúctil das misturas com micro PET a partir do formato das curvas obtidas, o que pode reduzir o potencial de fissuração das misturas solo-cimento devido a tendência de comportamento frágil experienciado por elas, caso haja compatibilidade entre a resistência de pico, quantidade de cimento e teor de PET. Quanto maior é o teor de substituição de cimento, mais dúctil se torna o material e, conseqüentemente, menor é sua a resistência à compressão simples. Tal fato deixa evidente que o teor de cimento é a variável determinante na resistência das misturas.

Finalmente, é importante destacar que, apesar da queda de resistência dos compósitos com PET em comparação à mistura de solo-cimento, todos os compósitos apresentaram resistência maior que a do solo puro compactado, demonstrando viabilidade técnico-ambiental da solução proposta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7181: *Solo - Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7182: *Solo - Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12024: *Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12025: *Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DNIT 143-ES: *Pavimentação – Base de solo-cimento – Especificação de serviço*. Rio de Janeiro, 2022.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM (DER). DER/PR ES-P 11: *Pavimentação: solo-cimento e solo tratado com cimento*. Paraná, 2018.
- Barbalho, E. A., Da Silva, E. F., Rêgo, J.H. (2020). Estudo da proporção e argila calcinada no cimento LC3 para diferentes teores de substituição. *Revista Matéria*, v.25, n.01.
- Carvalho, B. V. (2019). *Avaliação do Comportamento Resiliente de um solo Argiloso com Inserção de Politereftalato de Etileno (PET) para Aplicação em Base de Pavimentos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro / PUC-Rio, p. 144.
- Casagrande, M. D. T. (2005). *Comportamento de solos reforçados com fibras submetidas a grandes deformações*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul / UFRGS, 219 p.
- Ferreira, J. W. S. (2019). *Comportamento mecânico de misturas solo-cimento para aplicação em pavimentos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Londrina / UEL, 149 p.
- Garcez, L. R. (2023). *Propriedades físicas e mecânicas da mistura de solo-cimento, utilizando o cimento LC3 (Limestone Calcined Clay Cement) e a incorporação das matérias-primas: sílica ativa, cinza volante, cinza do bagaço de cana (Saccharum officinarum L) e cinza do caroço do açaí (Euterpe precatoria Martius)*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” / Unesp, p. 169.
- Gonçalves, F., Zanin, R. F. B., Somera, L. F., Oliveira, A. D., Ferreira, J. W. S., Costa Branco, C. J. M., Teixeira, R. S. (2018). *Caracterização Físico-química e mineralógica de três solos do estado do Paraná*. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG.
- Louzada, N. S. L. (2015). *Experimental Study of Soils Reinforced with Crushed Polyethylene Terephthalate (PET) Residue*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro / PUC-Rio, p. 127.
- Metzker, S. L. O., Sabino, T. P. F., Mendes, J. F., Ribeiro, A. G. C., Mendes, R. F. (2022). Soil-Cement Bricks Development Using Polymeric Waste. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, n. 14, p. 21034–21048.
- Thomas, M. (2019). Estudo de um solo argiloso laterítico com adições de resíduos de PET em pó e em flocos. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Pampa / Unipampa, p. 144.
- Romão, W., Spinacé, M. A. S., De Paoli, M. A. (2009). Poli(Tereftalato de Etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. *Polímeros*, v. 19, n. 2: p. 121–132

- Scrivener, K. L., John, V. M., Gartner, E. M. (2018). Eco-Efficient Cements: potential economically viable solutions for a low-co2 cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 2–26.
- Wit, Wijnand et al. (2019). *Solucionar a poluição plástica: transparência e responsabilização*. Geneva: World Wildlife Fund, 48 p. Disponível em <https://jornalismsocioambiental.files.wordpress.com/2019/03/plastic_report_02-2019.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2024.