

## Avaliação da Resistência à Compressão Simples de Solo Expansivo Estabilizado com Cal e Politereftalato de Etileno (PET)

Plácido de Sousa Santana

Egresso do Curso de Engenharia Civil, Campina Grande, Brasil, [placidosouza40@gmail.com](mailto:placidosouza40@gmail.com)

Carina Silvani

Professora, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, [carinasilvani@gmail.com](mailto:carinasilvani@gmail.com)

Juliette Macena de Souza

Doutoranda, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, [juliette-souza@hotmail.com](mailto:juliette-souza@hotmail.com)

Vitor Braga de Azevedo

Mestrando, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, [vitorba.eng@gmail.com](mailto:vitorba.eng@gmail.com)

João Pedro Camelo Guedes

Doutorando, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, [joaopedro\\_guedes@hotmail.com](mailto:joaopedro_guedes@hotmail.com)

**RESUMO:** Grande parte dos resíduos gerados na atualidade são produtos plásticos, principalmente politereftalato de etileno (PET). Uma opção sustentável para reaproveitamento é incorporá-los na construção civil para estabilização de solos expansivos. Os solos expansivos se caracterizam pelo aumento de volume quando há aumento na umidade e são responsáveis por inúmeros prejuízos financeiros ao redor do mundo. Nesse sentido, o presente trabalho visa avaliar a resistência à compressão simples de um solo expansivo estabilizado com o PET e cal. O solo expansivo utilizado nesta pesquisa foi estabilizado com adições de PET micronizado iguais a 5% e 10%, e adições de cal iguais a 2%, 4% e 6%. O ensaio realizado para a obtenção dos resultados foi o de compressão simples e as misturas de solo-cal-PET foram compactadas com peso específico aparente seco igual a 15 kN/m<sup>3</sup>, com umidade de 19%. Os resultados mostraram que maiores teores de cal nas misturas resultam em maiores resistências. A adição de PET nas misturas gerou menores valores de resistência à compressão simples do que as misturas com solo-cal. Isso ocorre porque o PET micronizado, em temperaturas ambientes, é quimicamente inerte, não reagindo com o solo ou com a cal. Entre as misturas avaliadas, a combinação que gerou melhores resultados foi com 10% de PET e 6% cal que se aproximou da resistência do solo-cal com 6% de cal, propiciando assim uso sustentável para a imensa quantidade de PET que existe nos aterros sanitários e na natureza.

**PALAVRAS-CHAVE:** Solo Expansivo, Estabilização Química, Estabilização Física, Reutilização de Resíduos.

**ABSTRACT:** Much of the waste generated today is plastic products, mainly polyethylene terephthalate (PET). A sustainable option for reuse is to incorporate them into civil construction to stabilize expansive soils. Expansive soils are characterized by an increase in volume when there is an increase in humidity and are responsible for countless financial losses around the world. In this sense, the present work aims to evaluate the simple compression resistance of an expansive soil stabilized with PET and lime. The expansive soil used in this research was stabilized with additions of micronized PET equal to 5% and 10%, and additions of lime equal to 2%, 4% and 6%. The test carried out to obtain the results was simple compression and the soil-lime-PET mixtures were compacted with an apparent dry specific weight equal to 15 kN/m<sup>3</sup>, with a humidity of 19%. The results showed that higher lime contents in the mixtures result in greater resistance. The addition of PET to the mixtures generated lower values of simple compressive strength than mixtures with soil-lime. This occurs because micronized PET, at room temperatures, is chemically inert, not reacting with soil or lime. Among the mixtures evaluated, the combination that generated the best results was with 10% PET and 6% lime, which approached the resistance of soil-lime with 6% lime, thus providing a sustainable use for the immense amount of PET that exists in landfills and in nature.

**KEYWORDS:** Expansive Soil, Chemical Stabilization, Physical Stabilization, Waste Reuse.

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Ferreira (1995) os solos expansivos podem ser definidos como solos argilosos que têm seu comportamento relacionado à instabilidade volumétrica ao sofrer variação de umidade ou sucção. De maneira geral, o comportamento desses solos caracteriza-se pelo acréscimo de volume (expansão) quando há aumento na umidade e redução de volume (contração) ao perderem umidade.

A execução de obras de engenharia em solos que apresentam instabilidade volumétrica, quando umedecidos podem causar sérios problemas. As edificações construídas sobre esse solo podem apresentar fissuras diagonais abaixo das janelas e acima das portas, ondulações e rupturas nos pavimentos, além de fissuras generalizadas longitudinais e transversais. Em campo, solos expansivos apresentam fissuras ou fendas características, que podem ser observados principalmente nas estações mais secas do ano (PAIVA, 2016).

Neste sentido, um solo expansivo não apresenta as características técnicas apropriadas para o uso em obras de engenharia. Uma alternativa viável em muitos projetos geotécnicos é a utilização de técnicas de estabilização de solos, que incluem abordagens mecânicas, químicas, físicas. Dentre as diversas técnicas, destaca-se o melhoramento do solo através da inserção de aditivos químicos, como o cimento Portland e a cal. A estabilização química provoca no solo mudanças nas características de compactação, plasticidade, variação de volume, resistência mecânica e tensão-deformação (LIMA *et al.*, 1993).

Na tentativa de soluções sustentáveis, tem-se estudado a possibilidade do uso de polímeros, especificamente, o Politereftalato de Etileno (PET) na estabilização de solo expansivos. De acordo com o 11º Censo da Reciclagem do PET no Brasil, o país descartou no ano de 2019 aproximadamente 565 toneladas de embalagens de PET, desse montante foram recicladas cerca de 55%, que em volume equivale a 311 mil toneladas do produto (ABIPET, 2020).

É importante ressaltar que a utilização do PET na mesma cadeia produtiva de embalagem de alimentos e bebidas é inviável, visto que os recipientes PET são propensos a absorver contaminantes que podem ser liberados e contaminar os produtos ao serem embalados (TAREFDER; ZAMAN, 2010). Diante disso, é importante que haja o estímulo à utilização de produtos recicláveis e o incentivo ao desenvolvimento de pesquisas que deem destino ao plástico que seria descartado.

Neste sentido, o presente trabalho atua em duas frentes. A primeira delas visa estabilizar um solo expansivo melhorando suas propriedades mecânicas a fim de tornar o seu uso tecnicamente viável em obras de engenharia. A segunda frente do trabalho aborda uma temática ambiental, ao utilizar o resíduo de PET na mistura com solo busca-se dar destino a uma imensa quantidade de material que é muitas vezes é descartada de forma irregular na natureza, e que é responsável por ocupar uma significativa parcela do espaço nos aterros sanitários.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

#### 2.1.1 PET

O PET utilizado nesta pesquisa apresenta-se na forma de pó, ou seja, cominuído em partículas cuja dimensão máxima é de 0,6 mm. O material foi adquirido em indústria de reciclagem, localizada na cidade de Campina Grande – PB. A empresa responsável realiza o beneficiamento e reaproveitamento de resíduos sólidos plásticos, oriundas do pós-consumo, produz em média, 350 ton/mês de flakes de PET, os flakes são flocos de PET resultantes do processo de moagem.

Neste estudo, utilizou-se o PET em pó, com dimensões entre 0,074mm e 0,6 mm, que para fins comerciais é denominado de PET micronizado. Os dados de caracterização do PET micronizado utilizados nesta pesquisa foram obtidos por Silva *et al.*, (2015), Almeida (2016) e Souza Junior (2021). Almeida (2016) observou, através da caracterização física, que PET micronizado é classificado como um material muito fino, com módulo de finura de 1,29. O material apresenta dimensão máxima dos agregados de 0,6mm, sendo a massa unitária no estado solto igual a 629 kg/m<sup>3</sup> e massa unitária no estado compactado igual a 768 kg/m<sup>3</sup>.

Souza Junior (2021) determinou a massa específica do PET por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier utilizando a norma NBR 16605 (ABNT, 2017) para cimento Portland e outros materiais em pó. O autor obteve o resultado de massa específica do PET de  $1,40 \text{ g/cm}^3$ .

Silva *et al.* (2015) realizaram a caracterização química do PET: ensaios de difração de raios X, análise termo gravimétrica derivada e análise térmica diferencial.

### 2.1.2 Solo

O solo expansivo utilizado nesta pesquisa é oriundo da região rural do município de Paulista-PE. As amostras foram coletadas conforme a NBR 9820 (ABNT, 1997) entre as profundidades de um 1 e 1,4 metros e transportadas ao laboratório de engenharia de pavimentação (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande. As propriedades físicas do solo são apresentadas na Tabela 1, a seguir:

Tabela 1. Propriedades físicas do solo.

Ensaio	Propriedade	Valor
<b>Limites de Atterberg</b>	Limite de liquidez (%)	49
	Limite de plasticidade (%)	21
	Índice de plasticidade (%)	28
<b>Massa específica dos grãos</b>	Peso específico das partículas do solo ( $\text{kN/m}^3$ )	26,50
<b>Distribuição granulométrica</b>	Areia (%)	10,58
	Silte (%)	43,96
	Argila (%)	45,46
<b>Compactação (Proctor normal)</b>	Peso específico máximo ( $\text{kN/m}^3$ )	15,4
	Umidade ótima (%)	23
<b>Azul de metileno</b>	Capacidade de troca catiônica ( $\text{meq}/100 \text{ g}$ )	59,20
	Superfície específica do solo ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	462,01
<b>Classificação SUCS</b>	Argila de alta compressibilidade	-
<b>Classificação HRB</b>	Solo fino de alta compressibilidade (A-7-6)	-

O ensaio de fluorescência de raio X foi realizado por Tenório (2019) com atmosfera de vácuo e utilizou catodos de cobre. Os principais componentes do solo são dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Os óxidos silício, alumínio e ferro representam 85% dos constituintes do solo, essa característica permite que este material tenha potencial para reagir com a cal e desenvolver reações pozolânicas.

Os resultados do ensaio de difração de raios X obtidos por Tenório (2019) apresentam picos de quartzo e bandas de muscovita e esmectita, essas últimas são argilominerais expansivos. A forma amorfa dos argilominerais, indicada pelas bandas, possibilita a reação com íons de cálcio, originando silicatos de cálcio hidratados e o aumento da resistência do solo ao ser estabilizado com cal.

### 2.1.3 Cal

A cal hidratada utilizada na pesquisa foi adquirida no comércio local de Campina Grande – PB. A cal foi utilizada como aditivo do solo para garantir um melhor desempenho das propriedades mecânicas das misturas solo-PET. Com relação a densidade, Silvani *et al.* (2020) observou que corresponde a  $2,41 \text{ g/cm}^3$ , apresentando, estequiometricamente, 82,0% de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e 8,7% de  $\text{CaCO}_3$ .

## 2.2 Métodos

### 2.2.1 Planejamento experimental

As variáveis controláveis do programa experimental, são representadas pelos teores de PET ( 2%; 4%; 6%) e os teores de cal (5%; 10%). Os teores de cal foram definidos com base no ensaio do Consumo Inicial de Cal (ICL), que é de 6% e foi obtido por Tenório (2019), já os teores de PET foram obtidos do estudo de Souza Junior (2021).

As variáveis fixas deste estudo são o peso específico seco aparente ( $15 \text{ kN/m}^3$ ) que foi definido através da curva de compactação do ensaio de compactação Proctor Normal obtida por Tenório (2019) e Silvani *et al.*, (2020). O teor de umidade de moldagem utilizado para todas as amostras que foi igual a 19% e baseou-se no mesmo ensaio. E o tempo de cura adotado foi de 56 dias, devido às reações pozolânicas serem lentas.

### 2.2.2 Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova utilizados para o desenvolvimento deste trabalho possuem formato cilíndrico tendo altura de 100 mm e diâmetro de 50 mm. Para a confecção dos corpos de prova, inicialmente ocorreu a pesagem do solo, da cal e do PET de acordo com teores pré-definidos de cada um desses materiais. Em seguida, foi preparada a mistura: adicionando em um recipiente o solo, a cal, o PET e a água e, os materiais foram misturados até a completa homogeneização.

### 2.2.3 Ensaio resposta

O ensaio utilizado para mensurar a resistência mecânica dos corpos de prova foi o de compressão simples seguindo o método da NBR 12025 (ABNT, 2012). O detalhamento dos ensaios de compressão simples encontra-se disposto na Figura 1. Ressalta-se que os ensaios para cada teor de cal e PET foram feitos em triplicata, totalizando 18 ensaios de compressão simples.

Os ensaios de compressão simples foram realizados com os corpos de prova curados por 56 dias. Antes da ruptura os corpos de prova foram inundados em água por 24 horas, visando elevar a saturação dos corpos de prova e minimizar os efeitos da sucção na resistência à compressão simples (SALDANHA; CONSOLI, 2016). O equipamento utilizado na ruptura dos corpos de prova foi a prensa hidráulica *Shimadzu*, os corpos de prova foram rompidos com velocidade de carregamento de  $1,14 \text{ mm/minuto}$ .

Peso específico	Teor de PET	Teor de cal	Nº de repetições	TOTAL DE ENSAIOS
15 kN/m <sup>3</sup>	5%	2%	3	18
		4%	3	
		6%	3	
	10%	2%	3	
		4%	3	
		6%	3	

Figura 1. Detalhamento do ensaio de compressão simples

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 Resistência à Compressão Simples

Os corpos de prova apresentam peso específico fixo de  $15 \text{ kN/m}^3$ , umidade de 19% e os teores de cal e de PET variáveis. Os resultados do ensaio de compressão simples mostraram que ocorreu o rompimento dos corpos de prova com 2% de cal com a inundação.

### 3.2 Efeito do Teor de Cal

Tenório (2019) realizou ensaios de resistência à compressão simples com o mesmo solo estudado nesta pesquisa. Para fins de análises e comparações dos resultados da mistura solo-cal com a mistura solo-cal-PET serão utilizados os dados de ruptura dos corpos de prova obtidos pelo autor.

A Figura 2 apresenta as retas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função do teor de Cal nas misturas.

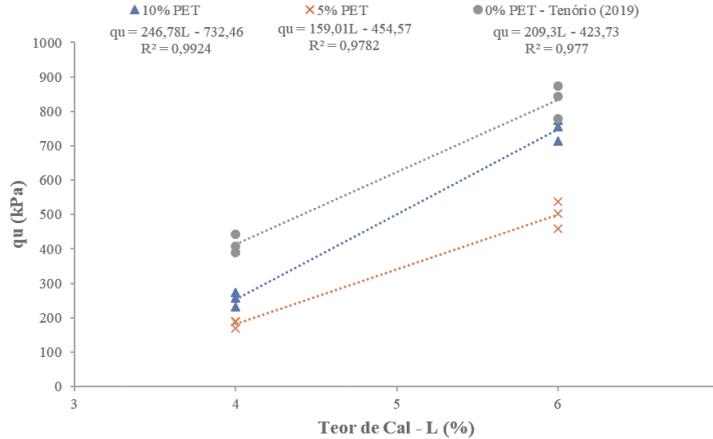


Figura 2. Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras

Observando isoladamente cada curva da Figura 3 é possível perceber que o aumento do teor de cal de 4% para 6%, independente do teor de PET, promove ganhos na resistência mecânica dos corpos de prova. Esse comportamento é esperado e amplamente reportado na literatura (INGLES E METCALF, 1972; LOVATO, 2004; SILVANI, 2017; TENÓRIO, 2019). O ganho de resistência pela adição de cal ocorre através das reações pozolânicas, devido à formação de produtos cimentantes. Os géis de silicato resultantes da reação cobrem e ligam as partículas de argila, bloqueando os vazios e melhorando a resistência do solo estabilizado.

Os corpos de prova CP1, CP2, CP3, CP10, CP11 e CP12 que continham 2% de cal independentemente do teor de PET da mistura não resistiram ao processo de inundação. Isso se deve, provavelmente, ao fato de toda a cal adicionada ao solo (para esse teor) ser consumida nas primeiras etapas da reação. Na primeira etapa ocorre a troca catiônica e a floculação e, como a cal é inteiramente consumida nessa etapa, não há cal disponível na mistura para a etapa da cimentação que seria responsável pelo aumento da resistência mecânica.

### 3.3 Efeito do Teor de PET

Na Figura 3 estão dispostas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função do teor de PET das misturas, cada curva isoladamente possui o mesmo teor de cal. Considerando o mesmo teor de cal, a inserção de PET na mistura provocou uma redução na resistência à compressão simples dos corpos de prova quando comparados com os corpos de prova estabilizados apenas com a cal. Para o teor de 4% de cal, a adição de 5% de PET ocasionou uma redução na resistência de aproximadamente 56,1%, já a adição de 10% de PET provocou uma redução de 38,4% na resistência da mistura. Avaliando o teor de 6% de Cal, pode-se observar que a adição de 5% de PET provocou uma redução de 40% da resistência dos corpos de prova analisados, enquanto a adição de 10% de PET reduziu a resistência dos CPs em 10,1%.

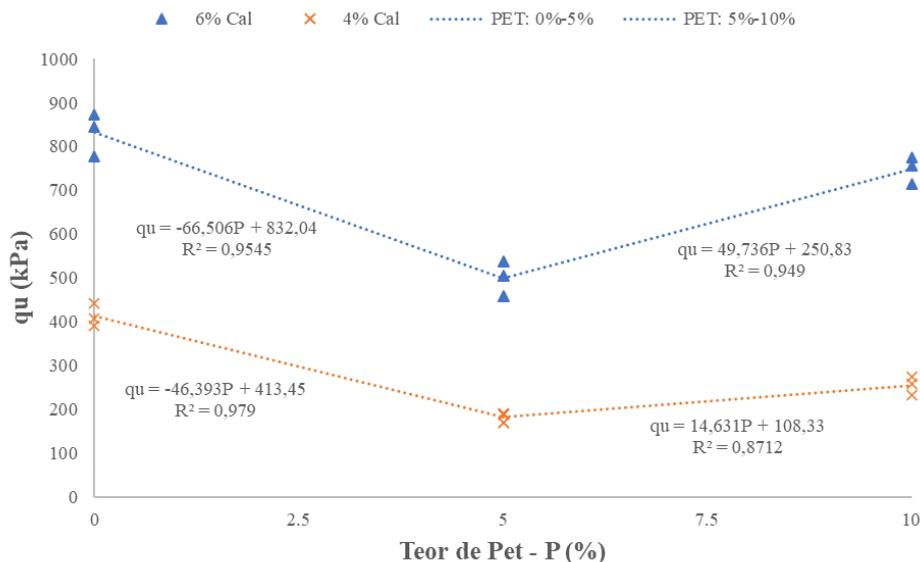


Figura 3. Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de PET das amostras.

A Figura 4 apresenta uma foto dos CP2, CP3, CP11 e CP12 ainda imersos pouco antes da ruptura. Embora o teor de PET na mistura dos CPs com 2% de cal não impeça que eles se deteriorem durante o processo de imersão, o CP11 e o CP12 (com 10% de PET) visualmente apresentam maior capacidade de resistir a inundação quando comparados com os CP2 e CP3 (com 5% de PET). Isso ocorre porque o solo que tem propriedades expansivas é substituído pelo PET que é um material volumetricamente estável, ou seja, nos CPs com maiores percentuais de PET existe proporcionalmente menos solo e, portanto, menor potencial de expansão.



Figura 4. CPs com 2% de Cal antes da ruptura

Como observado, o PET provoca uma redução na resistência à compressão simples dos corpos de prova. Essa redução ocorre, possivelmente, porque o PET é quimicamente inerte em temperatura ambiente, ou seja, ele atua apenas alterando a granulometria na mistura. Dessa maneira, não há relação linear entre a variação do teor de PET na mistura e a variação da resistência dos corpos de prova.

### 3.4 Comparação de diferentes estabilizantes no solo expansivo

Assim como a cal, o cimento também pode ser utilizado como estabilizante na tentativa de melhorar as propriedades geotécnicas de um solo. Braz (2018) estudou o mesmo solo utilizado nesta pesquisa, e utilizou o cimento como estabilizante químico. Na Figura 5 são apresentadas as informações da variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cal ou de cimento das misturas.

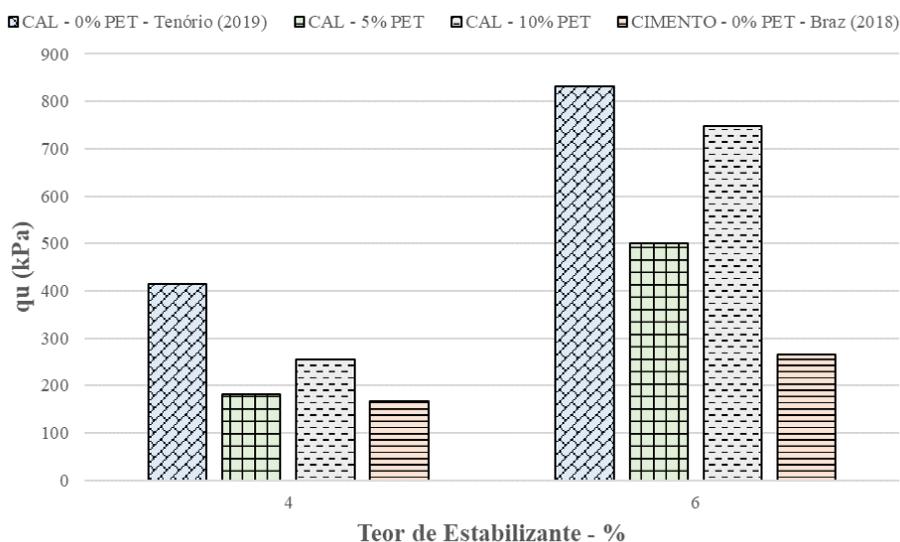


Figura 5. Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de estabilizante das amostras.

A inserção do PET na mistura reduz a resistência quando comparado com a mistura solo-cal, mas apresenta melhores resultados quando comparados com a mistura solo-cimento. Considerando o teor 4% de estabilizante (cal ou cimento) e em relação a mistura solo-cimento, as misturas de solo-cal-pet com 5% e 10% de PET apresentam maiores valores de resistências, respectivamente, 8,22% e 34,59%. Ao avaliar o teor de 6% de estabilizante, as misturas de solo-cal-pet com 5% e 10% de PET apresentam em relação mistura solo-cimento um aumento na resistência de 47,03% e 64,63%, respectivamente. Para o teor de 6% de estabilizante,

a resistência do solo com 10% de PET se aproxima da resistência do solo estabilizado apenas com a cal (0% de PET) o que reforça a hipótese da não linearidade entre a variação do teor de PET e a variação resistência da mistura.

Para o solo estudado, é possível observar que o solo-cal apresenta melhores resultados de resistência que o solo-cimento. Isso ocorre porque o solo estudado tem propriedades expansivas, de modo que as primeiras reações desencadeadas pela cal (troca catiônica e floculação) conseguem controlar melhor a tendência de expansão do solo em relação a reação de hidratação gerada pela adição do cimento.

#### 4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos pelos pesquisadores mostram que houve uma redução na resistência à compressão simples dos corpos de prova para os teores de PET de estudados (5% e 10%) em relação ao solo estabilizando somente com cal. A redução na resistência ocorre devido à natureza quimicamente inerte do PET em temperaturas ambientes. Nesse sentido, o PET não reage nem com o solo e nem com a cal na mistura. Assim sendo, o PET provocou uma pior interação entre as partículas do solo ocasionando a diminuição da resistência quando comparada com a mistura solo-cal.

A variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cal utilizado nos corpos de prova se comportou como esperado: maiores teores de cal geraram maiores valores de resistência à compressão simples. Esse comportamento é amplamente reportado na literatura e ocorre porque em misturas com maiores teores de cal a etapa rápida das reações (troca catiônica e floculação) ocorre nas misturas e, ainda há no solo cal disponível para que haja as reações pozolânicas que geram agentes cimentantes e provocam aumentos na resistência. Os resultados mostraram que os corpos de prova que continham 2% de cal não resistiram ao processo de inundação. Isso ocorre porque toda a cal adicionada ao solo (para esse teor) é consumida nas primeiras etapas da reação, portanto não há cal disponível na mistura para a etapa da cimentação que seria responsável pelo aumento da resistência mecânica. Nesse sentido, quanto mais agentes cimentantes são formados no solo maiores são as melhorias na resistência.

Para os teores de PET estudados nesta pesquisa, as misturas solo-cal-PET, em todos os cenários, apresentaram piores resultados de resistência à compressão simples quando comparados com os resultados produzidos pela mistura solo-cal. Como não há relação linear entre a variação do teor de PET nas misturas e a variação da resistência dos corpos de prova, é preciso testar empiricamente outros teores de PET na mistura para analisar os resultados por eles produzidos. Nesse contexto, é mais viável, tecnicamente, utilizar o solo estabilizado somente com cal do que adicionar PET nos teores de 5% e 10%. Entretanto, as misturas com 5% e 10% de PET apresentaram melhores resultados de resistência do que as misturas solo expansivo-cimento. Nesse sentido, a estabilização com PET e cal (para os teores avaliados) é uma alternativa para a estabilização com cimento.

A mistura com 6% de cal e 10% de PET apresentou resultados próximos ao da mistura estabilizada apenas com 6% de cal. Para esse teor, a estabilização com PET é vantajosa pois garante uma destinação adequada para um resíduo que existe em abundância, que não pode ser reinserido na mesma cadeia produtiva e que ocupa considerável parcela de espaço nos locais de posição final. Além disso, a inserção desse teor de PET não gera expressivas reduções na resistência do solo.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPET. Associação Brasileira da Indústria de PET. 11º Censo de Reciclagem do PET no Brasil. 2020. Disponível em: </ <https://www.abipet.org.br/> />. Acesso em 25 de agosto de 2021.

Associação Brasileira De Normas Técnicas (2012). NBR 12025. *Solo-cimento — Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas (2017). NBR 16605. *Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. — Método de ensaio*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas (1997). NBR 9820. *Coleta de amostras indeformadas de solos de baixa consistência em furos de sondagem – Procedimento*. Rio de Janeiro.

Almeida, S, P. Uso de politereftalato de etileno (pet) como agregado em peças de concreto para pavimento intertravado. Tese (Doutorado) da Universidade Federal de Campina Grande. 119p. 2016.

Braz, R. I. F. Avaliação da resistência de um solo expansivo do município de Paulista-PE melhorado com cimento Portland. Monografia da Universidade Federal de Campina Grande. 2018.

- Consoli, N. C.; Quiñonez, R. A.; Villalba, N. M. K. Durability, strength and stiffness of dispersive clay-lime blends. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 28, n. 11, 2016.
- Ferreira, S. R. M. Colapso e expansão de solos naturais não saturados devido à inundação. Tese (Doutorado) da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 401 p. 1995.
- Ingles, O.G.; Metcalf, J.B. *Soil Stabilization: Principles and Practice*. Sidney: Butterworths, 1972.
- Lima, D. C. Rohm, S. A. Barbosa, P. S. A. Estabilização dos Solos III (Misturas Solo-Cal para Fins Rodoviários). Universidade Federal de Viçosa. *Revista Universitária - publicação n° 334*, 46 p. 1993.
- Lovato, R. S. Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação. Dissertação (Mestrado) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 144p. 2004.
- Paiva, S. C. Estudo do comportamento geomecânico dos solos expansivos dos municípios de Cabrobó, Paulista e Ipojuca - PE e de suas misturas com cal. Tese (Doutorado) da Universidade Federal de Pernambuco. 190 p. 2016.
- Saldanha, R.B., Consoli, N. C. Accelerated Mix Design of Lime Stabilized Materials, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28 (3), 2016.
- Silva, J. A. A.; Rodrigues, J. K. G.; Carvalho, M. W.; Lucena, L. C. F. L.; Costa, D. B. Use of Micronized Polyethylene Terephthalate (Pet) Waste in Asphalt Binder. *Petroleum Science and Technology*, v. 33, p. 150-155, 2015.
- Silvani, C. Solos Artificialmente Cimentados em Célula Cúbica: Isotropia a Pequenas Deformações e na Ruptura. Tese (Doutorado) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 194p. 2017.
- Silvani, C.; Lucena, L. C. F. L.; Tenorio, E. A. G.; Scheuermann Filho, H. C.; Consoli, N. C. Key Parameter for Swelling Control of Compacted Expansive Fine-Grained Soil-Lime Blends. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 146, p. 06020012, 2020.
- Souza Junior, A. Avaliação da adição de polietileno tereftalato (pet) na expansibilidade dos solos. Dissertação (Mestrado) da Universidade Federal de Campina Grande. 118 p. 2021.
- Tarefder Rafiqul A., Zaman Arif M. Nanoscale Evaluation of Moisture Damage in Polymer Modified Asphalts”, *Journal of Materials in Civil Engineering*. v. 22, n.2, pp. 714-725, 2010.
- Tenório, E. A. G. Controle da expansão dos solos com resíduos de mármore e cal. Dissertação (Mestrado) da Universidade Federal de Campina Grande. 108 p. 2019.