

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/749

Fibras de PET como Material de Reforço de um Solo Expansivo

Aline Cátia da Silva
Doutoranda, UFPE, Recife, Brasil, aline.catia@ufpe.br

Silvio Romero de Melo Ferreira
Professor titular, UFPE, Recife, Brasil, silvio.ferreira@ufpe.br

RESUMO: Quando o material do subsolo apresenta comportamento de expansão e contração na presença de umidade, problemas de instabilidade podem ocorrer nas estruturas. Por outro lado, a fabricação do PET (Polietileno Tereftalato) gera resíduos que recebem muitas vezes um descarte inadequado, tornando-se um passivo ambiental. Assim, uma opção interessante é incorporá-los na Construção Civil por meio da melhoria de solos. O objetivo deste artigo é analisar a influência de fibras de PET no reforço de um solo expansivo, com a inclusão de 0,25%, 0,5%, 1% e 2% de fibras. A investigação experimental inclui ensaios de caracterização física, expansão “livre” e tensão de expansão, com corpos de prova moldados nas angulações de 0° e 90°, squeeze-flow e cisalhamento direto. As fibras de PET não mudam a granulometria do solo, mas diminuem a densidade e os limites de consistência. Os teores de 1% e 2% de fibras reduzem o peso específico seco máximo e a umidade ótima, provocam acréscimos na expansão “livre” e diminuem a tensão de expansão do solo. Nos ensaios de squeeze-flow, as fibras aumentam as tensões de escoamento e enrijecimento do solo, além de aumentarem a coesão e o ângulo de atrito nos ensaios de cisalhamento direto.

PALAVRAS-CHAVE: Argila Expansiva, Fibras, PET, Melhoramento, Squeeze-flow.

ABSTRACT: When the subsoil material has expansion and contraction behavior due to the presence of moisture, instability problems can occur in the structures. On the other hand, the manufacture of PET (Polyethylene Terephthalate) generates waste that is inadequately disposed often, becoming an environmental liability. Thus, an interesting option is incorporate it into Civil Construction through soils improvement. The objective of this article is to analyze the influence of PET fibers on the reinforcement of an expansive soil, with the inclusion of 0,25%, 0,5%, 1% and 2% of fibers. The experimental investigation includes physical characterization tests, “free” expansion and expansion stress, with specimens molded at angles of 0° and 90°, squeeze-flow and direct shear. The PET fibers do not change the grain size of the soil, but they reduce the density and consistency limits. Fiber contents of 1% and 2% reduce the maximum dry specific weight and optimum moisture, cause increases in “free” expansion and reduce the soil expansion stress. In squeeze-flow tests, the fibers increase yield stresses and stiffening stresses of the soil, in addition to increasing cohesion and the angle of friction in direct shear tests.

KEYWORDS: Expansive Clay, Fibers, PET, Improvement, Squeeze-flow.

1 INTRODUÇÃO

As argilas expansivas sofrem alterações volumétricas de expansão e contração devido a variação de umidade em sua estrutura, o que pode provocar danos ou até mesmo a inviabilização das construções. Estes solos são comumente encontrados em regiões com elevada evapotranspiração e baixa precipitação. Em estações de alta umidade há o inchamento do solo expansivo e, de acordo com Katti *et al.* (2010), a profundidade de zona ativa dos solos expansivos é de aproximadamente 1,5 metros, estando abaixo dessa profundidade a zona de volume constante. Em contrapartida, nas estações secas o solo contrai e fatura (SHI *et al.*, 2014).

No Brasil, a maioria dos casos de solos expansivos situam-se nas Regiões Nordeste e na mediação entre o Sul e o Sudeste (HOLANDA, 2022; SILVA *et al.*, 2022). Embora não se tenha no país a estimativa dos custos com prejuízos causados por esses solos, na Região Nordeste há registros de sérios danos em edificações,

canais de irrigação e pavimentos assentes em solos expansivos (MAIA *et al.*, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2018; SANTOS, 2021).

Sob outra perspectiva, a rápida urbanização e o consumo de materiais plásticos geram uma elevada quantidade de resíduos, sendo incluídos nesse contexto os produtos de Polietileno Tereftalato (PET), que se caracterizam por ser um passivo ambiental quando do seu descarte inadequado. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (2021), no Brasil, em 2019, 18,6% do volume total de rejeitos coletados foram de resíduos plásticos, sendo 5,6% desse percentual, exclusivamente, de materiais PET. O cenário apresentado reflete em um volume preocupante de resíduos, estimulando as ações de reutilização desse material.

A aplicação de materiais provenientes do PET vem sendo incluída na Construção Civil, como por exemplo em asfalto, piscinas, concreto e no âmbito geotécnico como aditivo para melhoria de solos (PONT; BELCHIOR; ARNS, 2019; SILVEIRA *et al.*, 2019; LUGEIYAMU *et al.*, 2021; SAJAD; SINGH, 2022). Assim, este artigo analisa o efeito de fibras de PET como reforço de um solo expansivo, buscando a melhoria das características do solo e a possibilidade da inserção dos PET à cadeia da Construção Civil.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Solo e Fibras de PET

O solo expansivo utilizado é proveniente do município de Paulista-PE e foram coletadas amostras deformadas de solo na profundidade de 1,0 a 1,4 m. As fibras são um subproduto da fabricação de materiais PET, foram obtidas em uma fábrica do Polo Petroquímico de Suape, no litoral Sul de Pernambuco (Figura 1a) e foram escolhidas por serem inertes e terem uma aquisição de baixo custo. As fibras são utilizadas com comprimentos de $12 \pm 0,5$ mm, sendo cortadas manualmente (Figura 1b).

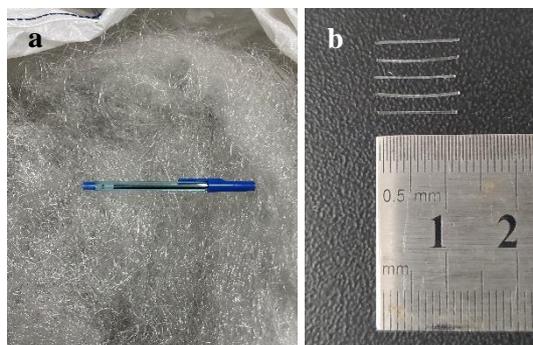


Figura 1. Fibras de PET: coletadas (a) e cortadas manualmente (b).

2.2 Programa Experimental

As fibras de PET são utilizadas como material aditivo para o solo expansivo nas proporções de 0,25%, 0,5%, 1% e 2%, em peso de solo seco, distribuídas de forma aleatória na massa de solo e tendo as seguintes denominações S-0,25F, S-0,5F, S-1F e S-2F, respectivamente.

A investigação experimental inclui a coleta, preparação dos materiais e a realização de ensaios de caracterização física, expansão “livre”, tensão de expansão, squeeze-flow e cisalhamento direto. Os ensaios de caracterização foram conduzidos de acordo com as normas brasileiras: NBR 6458 para a absorção e densidade real dos grãos; NBR 6459 e NBR 7180 para os limites de consistência; NBR 7181 para a análise granulométrica; e NBR 7182 para a compactação (ABNT, 2016a, 2016b, 2016c, 2016d e 2016e, nessa ordem). A granulometria foi feita com uso de defloculante, a densidade obtida pelo método do picnômetro e da bomba a vácuo, a absorção teve a duração de 48h e os ensaios de compactação utilizaram a energia normal.

Os ensaios de expansão “livre” e tensão de expansão seguiram as recomendações da norma D 4546 (ASTM, 2021). Todas as amostras foram preparadas na condição de peso específico seco máximo e umidade ótima, sendo compactados dois proctors para cada um dos materiais preparados. Do primeiro proctor, posicionado a 0°, foram moldados dois corpos de prova com anéis metálicos (Figura 2a), e do segundo proctor,

no ângulo de 90°, foram retirados mais dois corpos de prova com anéis metálicos (Figura 2b). Dois anéis, um de cada angulação, foram encaminhados para os ensaios de expansão “livre”, enquanto que os outros dois anéis foram levados para realizar o ensaio de tensão de expansão, ambos os ensaios feitos em prensas do tipo Bishop.

Para a realização dos ensaios de squeeze-flow foram adaptadas as seguintes peças, com base na NBR 15839 (ABNT, 2010): placa inferior metálica, gabarito em compensado naval, placa superior de acrílico e anel de moldagem de PVC (Figuras 2c, 2d, 2e e 2f, respectivamente). O procedimento do ensaio de squeeze-flow não é normatizado para a aplicação em solos, porém o método é ajustado com essa finalidade, sendo as amostras passadas na peneira nº 4 e preparadas na umidade do limite de liquidez. Foi utilizado um anel dinamométrico de 1000 N (Figura 2g), instalado em uma prensa hidráulica universal, que por sua vez funcionou na velocidade constante de 0,04 mm/s.

A execução dos ensaios de cisalhamento direto está de acordo com as prescrições da norma D 3080 (ASTM, 2004), sendo feitos ensaios não inundados, sob as tensões normais de 50, 100, 150 e 200 kPa e na velocidade de 0,048 mm/min. A moldagem dos corpos de prova foi realizada diretamente na caixa de cisalhamento (100 x 100 x 40 mm), em três camadas iguais, sob compactação estática e de forma a alcançar a condição de peso específico seco máximo e umidade ótima de cada material. A prensa de cisalhamento possui sistema de carregamento de peso em pendural e anel dinamométrico de 5000 N.

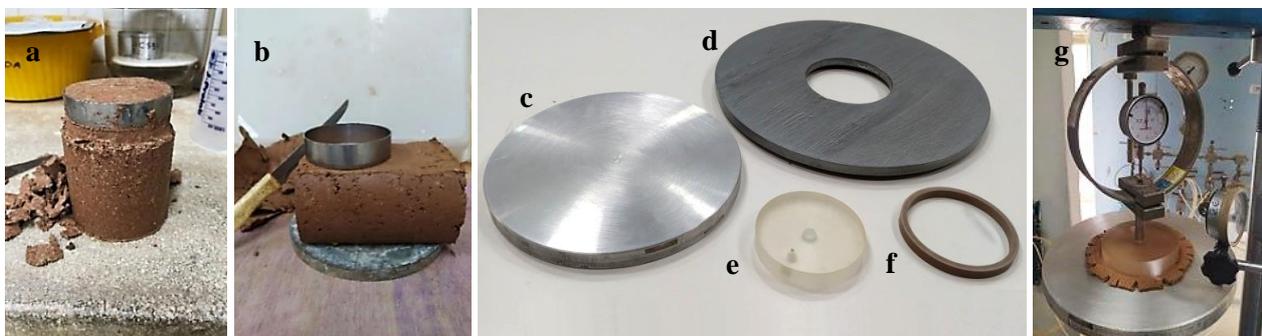


Figura 2. Moldagem com proctor posicionado a 0° (a) e na inclinação de 90° (b); peças para moldagem e realização do ensaio de squeeze-flow: placa inferior (c), gabarito (d), placa superior (e) e anel de moldagem (f); e anel dinamométrico do ensaio de squeeze-flow (g).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização Física

As fibras de PET têm um diâmetro médio de 0,5 mm, uma absorção de água de 1,1% e densidade de 1,3, próximo dos resultados de outros autores (PONT; BELCHIOR; ARNS, 2019; YARBASI; KALKAN, 2020). As frações granulométricas e as características geotécnicas do solo e das misturas formadas são apresentadas na Tabela 1. O solo é uma argila silto-arenosa de alta compressibilidade (CH), possui plasticidade muito alta ($IP > 40\%$), de acordo com o critério qualitativo de Burmister (1949), é considerado altamente plástico pela classificação de Jenkins ($IP > 15\%$), obtida em Caputo e Caputo (2015), e tem um índice de atividade (I_a) normal ($0,75 \leq I_a \leq 1,25$), conforme Skempton (1953).

As fibras não causam alterações na granulometria do solo e os valores de densidade dos grãos das misturas estão situados entre os valores do solo e das fibras, Tabela 1. Os valores de limite de liquidez de todas as amostras estão acima de 65% e, ainda que as fibras de PET tenham baixa capacidade de interação com a água, a sua adição reduz os limites de consistência e, conseqüentemente, o índice de plasticidade (IP) do solo. A plasticidade de todas as misturas de solo com as fibras é classificada como muito alta ($IP > 40\%$), de acordo com Burmister (1949).

Para os teores de 0,25% e 0,5% de fibras, praticamente, não há alterações no peso específico seco máximo ($\gamma_{d \text{ máx.}}$) e na umidade ótima ($w_{\text{ótima}}$) do solo, já com a inclusão de 1% e 2% há uma redução desses índices (Tabela 1). O decréscimo do $\gamma_{d \text{ máx.}}$ das misturas com os maiores teores de fibras é devido a massa específica das fibras ser bem inferior à do solo compactado, enquanto que o decréscimo da umidade ótima se deve a redução da fração argila e acréscimo no teor fibras, visto que a argila tem maior capacidade de reter

água e as fibras possuem uma menor capacidade de absorção.

Tabela 1. Características geotécnicas das amostras.

Parâmetros	Amostra				
	Solo	S-0,25F	S-0,5F	S-1F	S-2F
Pedregulho (%)*	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Areia (%)*	16,4	14,4	14,9	15,9	15,4
Silte (%)*	33,9	32,1	33,0	34,0	33,7
Argila (%)*	49,1	52,9	51,5	48,5	48,3
ρ	2,66	2,38	2,47	2,62	2,56
LL (%)	73,3	72,2	69,0	66,0	65,8
LP (%)	25,7	25,2	23,5	22,1	22,0
IP (%)	47,6	47,0	45,5	43,9	43,8
Ia	0,96	0,89	0,88	0,88	0,87
$\gamma_{d \text{ máx}}$	15,1	15,1	15,2	15,0	14,7
W _{ótima}	25,4	25,4	25,5	23,7	23,3
Classificação SUCS	CH	CH	CH	CH	CH
Classificação TRB	A-7-6	A-7-6	A-7-6	A-7-6	A-7-6

Obs.: (*) – descrição conforme a NBR 6502 (ABNT, 2022); ρ – densidade dos grãos; LL – limite de liquidez; LP – limite de plasticidade; IP – índice de plasticidade; Ia – índice de atividade; $\gamma_{d \text{ máx}}$ – peso específico seco máximo; W_{ótima} – umidade ótima; e CH – argila de alta compressibilidade.

3.2 Expansão “Livre” e Tensão de Expansão

As variações da expansão “livre” e da tensão de expansão por amostra, com moldagens nas angulações de 0° e 90°, são mostradas nas Figuras 3a e 3b, respectivamente. As misturas com os corpos de prova moldados a 0° mostram porcentagens de expansão “livre” maiores do que os corpos de prova moldados a 90°, com diferenças de até 2,6% entre os valores, Figura 3a. As expansões “livres” das misturas são próximas ao valor do solo (8,9%), contudo a mistura com 0,5% de fibras apresenta os menores resultados de expansão se comparados ao solo e as demais misturas, já a amostra “S-2F” indica os maiores valores dentre todas as expansões.

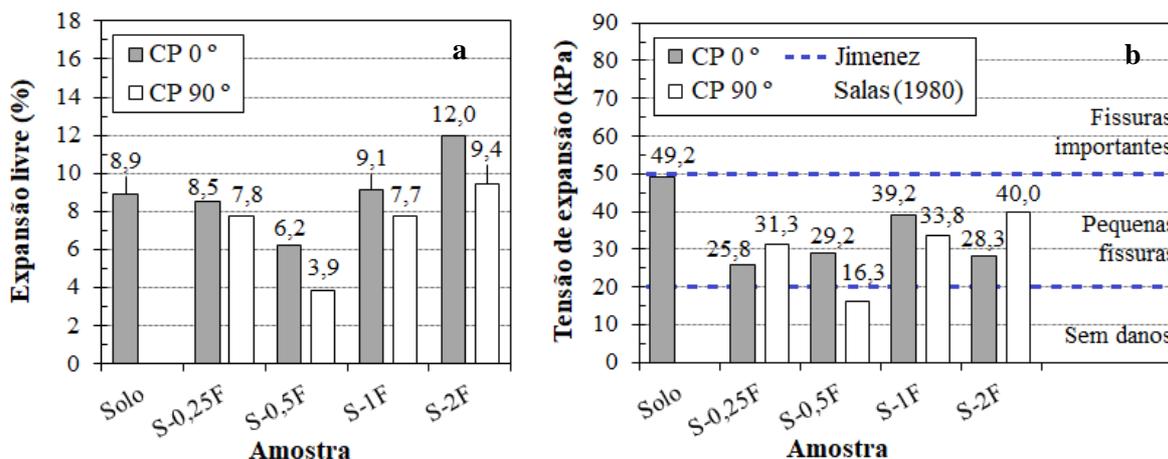


Figura 3. Variação da expansão “livre” (a) e da tensão de expansão por amostra (b).

As tensões de expansão das misturas, nas duas angulações de moldagem dos corpos de prova (0° e 90°), são menores do que o valor obtido para o solo (49,2 kPa), porém a diferença de angulação ou ainda a quantidade de fibras não indica uma tendência clara na redução dos resultados com o acréscimo do teor de fibras, Figura 3b. A avaliação direta quantitativa de Jimenez Salas (1980) indica que os danos em estruturas assentes sobre o solo expansivo ou um material formado pelas misturas de solo com as fibras resultam em pequenas fissuras, visto que a maioria das amostras apresenta tensões de expansão superiores a 20 kPa.

A mudança de angulação na moldagem influencia na orientação das fibras de PET dentro dos corpos de prova e causa diferenças nos resultados de expansão “livre” e tensão de expansão, mostrando que, embora as misturas sejam preparadas com a adição das fibras de forma aleatória, o processo de compactação proporciona uma suborientação das fibras dentro da massa de solo.

3.2 Squeeze-flow

O comportamento de interação entre as partículas em cada material, com amostras preparadas nas umidades do limite de liquidez, é apresentado nas curvas de carga *versus* deslocamento (Figura 4a), ao lado das imagens das amostras ao final do ensaio (Figura 4b). Na Tabela 2 são mostrados os índices do comportamento reológico do solo e das misturas estudadas.

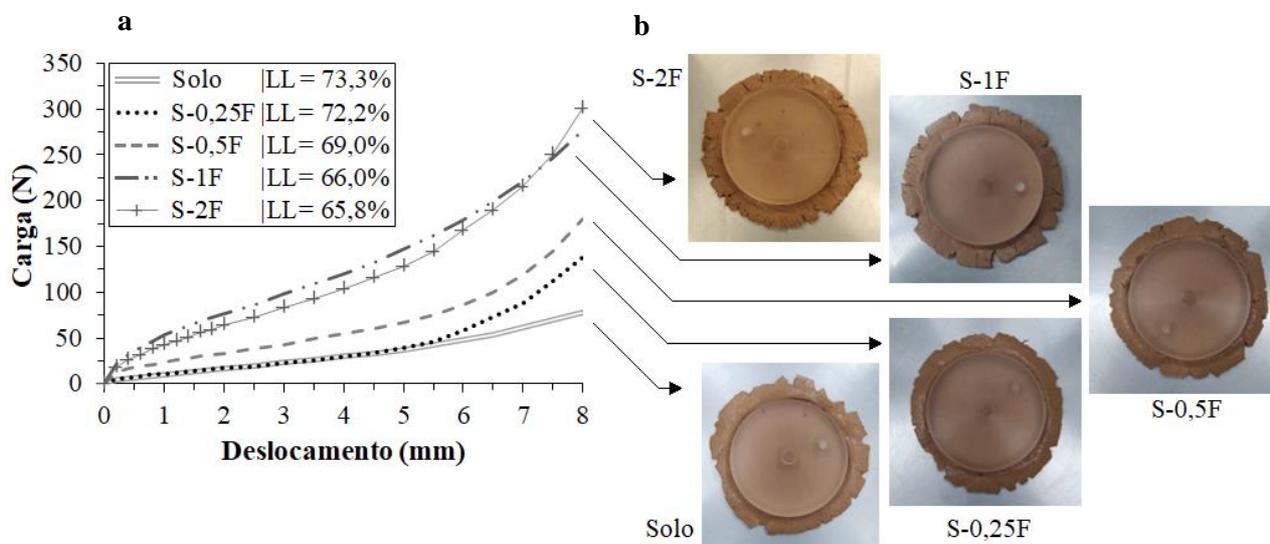


Figura 4. Curvas de carga \times deslocamento (a) e configuração final das amostras nas umidades correspondentes ao LL (b).

Tabela 2. Índices do comportamento reológico das amostras.

Índices	Amostra				
	Solo	S-0,25F	S-0,5F	S-1F	S-2F
w_i (%)	73,3	72,2	69,0	66,0	65,8
d_{esc} (mm)	0,15	0,25	0,25	0,35	0,3
P_{esc} (N)	3,0	5,5	13,5	30,0	22,0
σ_{esc} (kPa)	0,4	0,7	1,8	4,0	2,9
d_{enrij} (mm)	5,5	5,25	5,3	5,10	5,05
P_{enrij} (N)	42,0	41,5	71,0	150,0	130,0
σ_{enrij} (kPa)	5,6	5,5	9,4	19,9	17,2
P_f (N)	78,5	138,9	180,5	276,5	301,0

Obs.: w_i – umidade inicial; d_{esc} – deslocamento de escoamento; P_{esc} – carga de escoamento; σ_{esc} – tensão de escoamento; d_{enrij} – deslocamento de enrijecimento; P_{enrij} – carga de enrijecimento; σ_{enrij} – tensão de enrijecimento; e P_f – carga final.

As curvas de carga *versus* deslocamento não mostram descontinuidades de carregamento (Figura 4a), indicando a boa homogeneidade entre os componentes dos materiais ensaiados. As misturas com 1% e 2% de fibras necessitam de uma maior carga para dar continuidade ao carregamento, isso significa que as forças de atrito foram predominantes no espalhamento. Quanto a configuração final dos corpos de prova, observa-se que suas formas tendem a formar “pétalas de flor” (Figura 4b). Embora as fibras pouco alterem a estética do solo, a abertura das “pétalas” formadas torna-se mais definida nas amostras “S-1F” e “S-2F”, enquanto que no solo e nas misturas com até 0,5% de fibras há trechos nas bordas em que o material escoou e não fissura.

Os deslocamentos elásticos lineares (d_{esc}) são relativamente pequenos (inferiores a 1 mm) e os valores de tensão de escoamento (σ_{esc}) tendem a aumentar com o acréscimo no teor de fibras (Tabela 2). Em um estágio intermediário, em que a deformação radial pela compressão aplicada é mais nítida, são observados deslocamentos (d_{enrij}) sem grandes acréscimos de carga (Figura 4a). Os aumentos mais expressivos de tensão de enrijecimento (σ_{enrij}) no estágio intermediário pertencem as amostras de solo com o 1% e 2% de fibras, enquanto que a carga na fase final, em que prepondera o atrito entre a amostra e as placas, é maior para a mistura “S-2F” (Tabela 2).

3.3 Cisalhamento Direto

As curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal do solo e das misturas para cada tensão normal aplicada são apresentadas na Figura 5. A tensão máxima é alcançada com pico bem definido em todas as amostras submetidas as tensões normais de 50 e 100 kPa, Figuras 5a e 5b, respectivamente, já nas tensões de 150 e 200 kPa nota-se que o pico das curvas tem uma suave queda até o fim do ensaio, Figuras 5c e 5d, nessa ordem. A adição das fibras de PET causa um acréscimo na resistência máxima do solo em todos os níveis de tensões normais, sugerindo que as fibras de PET absorvem mais energia do que o solo isoladamente e majoram a tenacidade do solo.

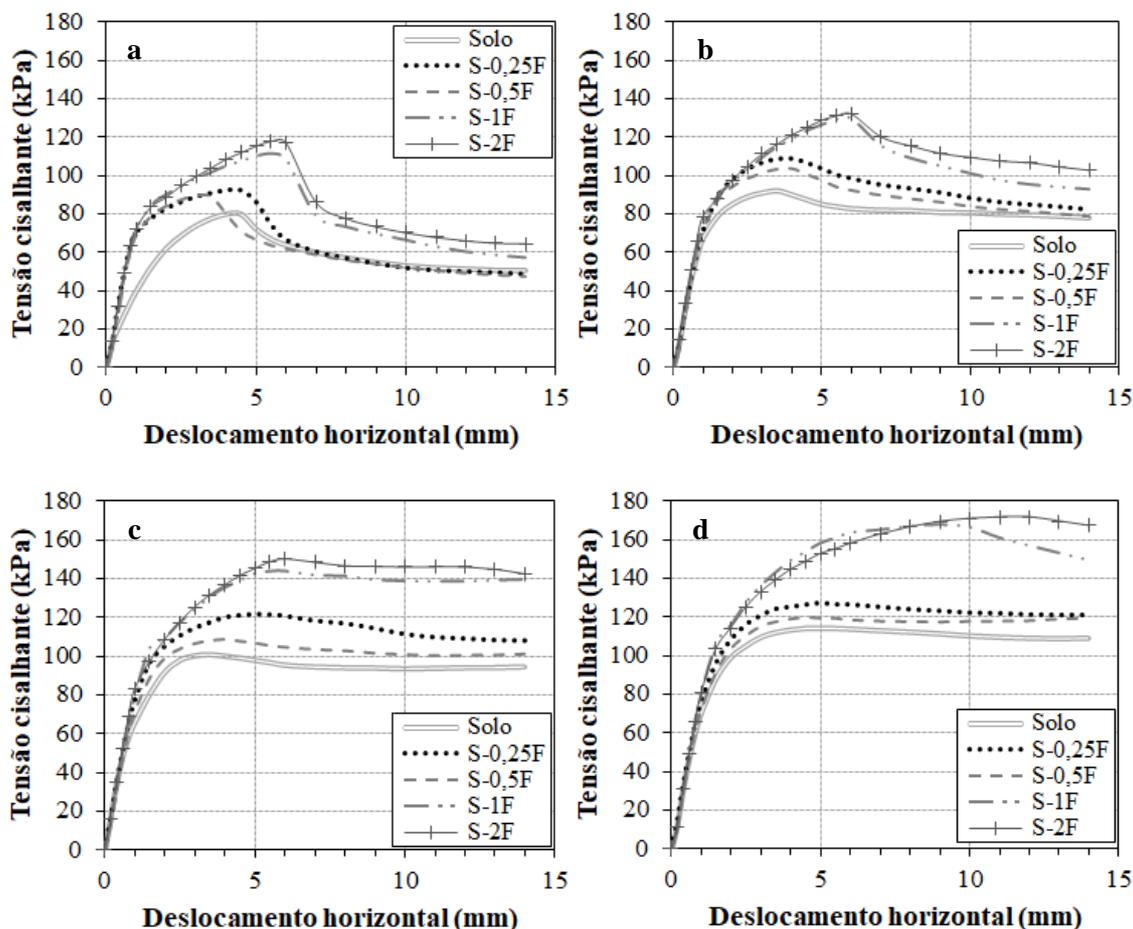


Figura 5. Curvas de tensão cisalhante \times deslocamento horizontal para as tensões de 50 kPa (a), 100 kPa (b), 150 kPa (c) e 200 kPa (d).

A partir das curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal são traçadas as envoltórias de resistência Mohr-Coulomb, que por sua vez permitem obter a coesão e o ângulo de atrito do solo e das misturas, cujos valores encontram-se na Tabela 3. A coesão e o ângulo de atrito das misturas na tensão máxima (condição de ruptura) são maiores do que os valores obtidos para o solo. Dentre as misturas, a proporção de 0,5% de

fibras de PET não seguiu o aumento de resistência de forma proporcional ao teor de fibras incorporado ao solo, mostrando ser o teor que menos contribui com os parâmetros de resistência do solo ao esforço de cisalhamento.

Tabela 3. Resultado dos ensaios de cisalhamento direto.

Parâmetros	Amostra				
	Solo	S-0,25F	S-0,5F	S-1F	S-2F
c (kPa)	69	83	82	94	100
ϕ (°)	12	13	10	18	17
R ²	0,99	0,96	0,98	0,99	0,99

Obs.: c – coesão; ϕ – ângulo de atrito; e R² – coeficiente de determinação.

4 CONCLUSÕES

As fibras de PET não mudam a granulometria do solo expansivo, mas reduzem a densidade dos grãos e os índices de consistência. A umidade ótima e o peso específico seco máximo do solo sofrem reduções com a adição de 1% e 2% de fibras de PET, enquanto que para os menores teores, praticamente, não há variação.

Nos ensaios de expansão “livre” a moldagem feita a 0° demonstra porcentagens de expansão maiores do que os resultados para as moldagens a 90°. O teor com 2% de fibras mostra os maiores valores dentre todas as expansões “livres”, enquanto que as tensões de expansão de todas as misturas são menores do que o obtido para o solo, independente da angulação de moldagem.

Foram adaptadas peças para os ensaios de squeeze-flow e nesses ensaios as cargas de escoamento e enrijecimento do solo tendem a aumentar com o acréscimo de fibras de PET.

Nos ensaios de cisalhamento direto as fibras tendem a ser mais mobilizadas em elevadas tensões e a adição das fibras de PET causa um acréscimo na resistência máxima, no ângulo de atrito e na coesão do solo.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio dado por meio da bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (2021) *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil*, 53 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016a). NBR 6458: *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016b). NBR 6459: *Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6502: *Solos e rochas – Terminologia*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016c). NBR 7180: *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016d). NBR 7181: *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016e). NBR 7182: *Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010). NBR 15839: *Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método squeeze-flow*. Rio de Janeiro.
- ASTM International (2004). D 3080: *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*.

- ASTM International (2021). D 4546: *Standard test methods for one-dimensional swell or settlement potential of cohesive soils*.
- Burmister, D. M. (1949) *Principles and techniques of soil identification*. Annual Highway Research Board Meeting, v. 29, Washington D.C., p. 402-433.
- Caputo, H. P., Caputo, A. N. (2015) *Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos*, 7th ed., LTC, Rio de Janeiro, Brasil, 252 p.
- Holanda, M. J. O. (2022) *Solos colapsíveis e expansivos no Brasil: classificação da suscetibilidade de ocorrência aplicando redes neurais artificiais*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UFPE, 159 p.
- Jimenez Salas, J. A. (1980) *Cimentaciones en terrenos expansivos o colapsables*. Geotecnia y cimientos, 1 ed., Editora Rueda, Madrid, p. 533-650.
- Katti, R., Kulkarni, U., Katti, A., Kulkarni, R. (2010) Stabilization of embankment on expansive soil – a case study. In: GeoShanghai International Conference, Shanghai, China, *Proceedings...*, p. 181-189.
- Lugeiyamu, L., Kunlin, M., Mensahn, E. S. K., Faraz, A. (2021) Utilization of waste polyethylene terephthalate (PET) as partial replacement of bitumen in stone mastic asphalt. *Construction and Building Materials*, 309, p. 125176.
- Maia, I. G., Coutinho, R. Q., Silva, B. Q., Cavalcante, F. P. (2018) Trincas longitudinais longas em pavimentos assentes sobre solos expansivos no município de Cabo de Santo Agostinho/PE. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 19, Salvador. *Anais... ABMS*, 11 p.
- Oliveira, S. J. C., Chaves, A. M. M., Mascena, D. W. A., Gonçalves, D. R. L., Bandeira, A. P. N., Souza Neto, J. B. (2018) Solo expansivo de fundação: estudo de caso de uma moradia popular em Picos-PI. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 19, Salvador. *Anais... ABMS*, 7 p.
- Sajad, S., Singh, H. (2022) Stimulation of black cotton soil via stone dust and PET fibre. *Materials Today: Proceedings*, 48 (5), p. 1633-1637.
- Santos, S. B. (2021) *Diagnóstico e proposta de solução para obra de canal assente em solo expansivo da Região de propria / SE*. Trabalho de conclusão de curso (graduação), UFSE, 82 p.
- Shi, B., Chen, S. S., Han, H., Zheng, C. F. (2014) Expansive soil crack depth under cumulative damage. *Scientific World Journal*, p. 1-9.
- Silva, A. C., Aquino, A. E. B., Alves, D. S., Ferreira, S. R. M. (2022) Avaliação do potencial colapsível e expansivo de solos do nordeste brasileiro por meio de métodos qualitativos e quantitativos. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 20, Campinas. *Anais... Galoá*. v. 1, p. 119717.
- Silveira, C. R., Fonseca, V., Vieira, W. A., Santos, A., Figueiredo, F. B. (2019) Análise das propriedades físicas e mecânicas da laje de concreto armado com adição de PET e bambu. *Colloquium Exactarum*, 11 (1), p. 11-20.
- Skempton, A. W. (1953) The colloidal activity of clays. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering 3. Zurich, Switzerland. *Proceedings...*, p. 57-61.
- Pont, G. M. D., Belchior, I. R. M., Arns, P. (2019) Análise do comportamento mecânico de misturas de um solo argiloso com fibras de PET e cal hidratada. In: Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul – GEOSUL 12, Joinville. *Anais... ABMS*, 9 p.
- Yarbasi, N., Kalkan, E. (2020) The mechanical performance of clayey soils reinforced with waste PET fibers. *International Journal of Earth Sciences Knowledge and Applications*, 2 (1), p. 19-26.