

Permeabilidade de Solos Arenosos do Sul do Brasil Reforçados com Fibra de Polietileno Tereftalato (PET)

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

Júlia Machado Fernandes
UEL, Londrina, Brasil, julia.machado.fernandes@uel.br

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

Avacir Casanova Andrello
UEL, Londrina, Brasil, acandrello@uel.br

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

RESUMO: Com a crescente preocupação ambiental em relação à geração excessiva de resíduos plásticos, que excede 300 milhões de toneladas anualmente no mundo, materiais alternativos vêm sendo estudados como elementos de reforço de solo, como as fibras de polietileno tereftalato (PET). A maioria das pesquisas tem focado no comportamento mecânico, havendo poucos estudos acerca da influência na permeabilidade. Esta pesquisa buscou avaliar a permeabilidade de dois solos arenosos da região sul do Brasil, reforçados com fibras de reciclagem de garrafas PET com 1,4dtex e 32mm de comprimento. A partir da compactação dos materiais utilizado a Energia Normal de Proctor, foram conduzidos ensaios de permeabilidade em permeâmetro de carga variável, nos solos compactados puros e nos compósitos solo-PET com adição de 0,3%, em relação a massa seca de solo, dispostas aleatoriamente. Também foram realizados ensaios de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM) para avaliar o efeito da inserção do reforço na distribuição dos micros e macroporos nas matrizes. Os resultados mostraram que a inclusão das fibras PET provocaram alterações na microestrutura em função do grau de evolução pedogenética dos solos, no entanto, estas alterações não foram suficientes para afetar os coeficientes de permeabilidade k das misturas, prevalecendo o efeito da compactação.

PALAVRAS-CHAVE: Reforço; Fibras; Misturas; PET; Permeabilidade; Porosimetria.

ABSTRACT: With the increasing environmental concern regarding the excessive generation of plastic waste, which exceeds 300 million tons annually worldwide, alternative materials are being studied as soil reinforcement elements, such as polyethylene terephthalate (PET) fibers. Most research has focused on the mechanical behavior, with few studies addressing the influence on permeability. This research aimed to evaluate the permeability of two sandy soils from the Southern region of Brazil reinforced with recycled PET bottle fibers with 1.4dtex and 32mm length. From compacted specimens using Proctor Normal Energy, permeability tests were conducted using the variable head test method on compacted soils without fiber addition and on soil-PET fiber mixtures with randomly distribution and 0,3% addition of fiber relative to the dry soil mass. Additionally, Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) tests were performed to evaluate the effect of reinforcement insertion on micro and macropore distribution. The results indicates that the inclusion of PET fibers caused alterations in the microstructure depending on the pedogenetic evolution degree of the soils, however these alterations were not sufficient to affect the permeability coefficients (k) of the mixtures, prevailing the effects of compaction.

KEYWORDS: Reinforcement; Fibers; Mixtures; PET; Permeability; Porosimetry.

1 INTRODUÇÃO

O reforço de solo com fibras é uma técnica desenvolvida e empregada pela humanidade há muito tempo. A intercalação de solo e mantas de raízes foi uma técnica utilizada pelos mesopotâmios (1.400 a.C.) na construção da Pirâmide de Ziggurat e da Torre de Agar Quf, ambas existentes até hoje (Palmeira, 1992).

Em um contexto mais recente, Correia *et al.* (2015) mencionam diversos exemplos do uso de solos reforçados com fibras na engenharia geotécnica, como estabilização de subleito e sub-bases de pavimentos, melhoria na capacidade de suporte de solos, estabilidade de taludes, aterros sobre solos moles, controle da condutividade hidráulica do solo, melhoria da erosão, prevenção de piping e mitigação de rachaduras de retração.

Com o avanço tecnológico, os materiais sintéticos substituíram as fibras vegetais degradáveis, dando origem a compósitos geotécnicos mais resistentes e duráveis, os geossintéticos. Senez (2016) afirma que, atualmente, é comum de se associar o termo compósito no meio geotécnico aos estudos de reforço de solos com fibras, principalmente fibras oriundas de materiais recicláveis que tem por objetivo a redução dos impactos ambientais gerados pela produção de resíduos sólidos no meio urbano.

Neste contexto, as fibras de PET, derivadas da reciclagem de garrafas PET, vêm demonstrando elevado potencial de aplicação na Geotecnia (Silva, 2007; Botero *et al.*, 2015; Ferreira *et al.*, 2021). No entanto, a grande maioria dos trabalhos existentes estão focados em avaliar os parâmetros de resistência e deformabilidade das misturas de solo e fibras de PET, deixando de analisar outras propriedades importantes na viabilização da aplicação do reforço em campo, como a permeabilidade.

A permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir a passagem de um fluido através dos seus poros, sendo comumente a água o fluido de interesse. É um parâmetro essencial para o estudo de estabilidade de encostas, aterros, barragens, obras de drenagem, entre outras. É expressa numericamente pelo coeficiente de permeabilidade (k), medido em unidade de distância por unidade de tempo (cm/s), e variável em função de diversos fatores, como a granulometria e tamanho das partículas, viscosidade do fluido, índices de vazios do solo, grau de saturação da amostra e a estrutura do solo.

Nos estudos envolvendo misturas de solo com fibras, o entendimento é que a inclusão de fibras de forma aleatória no solo leva a um aumento da permeabilidade, sendo este aumento proporcional à quantidade de fibra adicionada (Hoare, 1979; Maher & Ho, 1994; Bueno *et al.*, 1996; Miller & Rifai, 2004).

Tendo em vista os pontos levantados, esta pesquisa tem por objetivo avaliar a permeabilidade de dois solos arenosos, localizados na cidade de Mandaguáçu-PR e Santa Maria-RS, compactados e reforçados com fibras de PET dispostas aleatoriamente na massa de solo. Para isto, foram conduzidos ensaios de permeabilidade em permeômetros de carga variável nas amostras de solo puro e reforçados. Por fim, foram realizados também ensaios de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM) para avaliação da distribuição dos micro e macroporos dos compósitos com a inclusão das fibras no solo. A compreensão desta propriedade é fundamental para avaliar as possibilidades de aplicação das fibras PET na Geotecnia.

2 METODOLOGIA

Durante a fase experimental, foram conduzidos quatro ensaios de permeabilidade em permeômetro de carga variável, sendo dois no solo de Mandaguáçu (puro e com fibras) e dois no solo de Santa Maria (puro e com fibras), ensaiados na estrutura compactada na umidade ótima. As misturas contendo as fibras de PET possuem adição de 0,3% de fibra em relação a massa seca de solo, dispostas de maneira aleatória. Maiores detalhes sobre os materiais e ensaios realizados são apresentados a seguir.

2.1 Solos Utilizados

O solo do município de Mandaguáçu, situado no estado do Paraná, foi coletado a um metro de profundidade às margens da rodovia federal BR-376, de coordenadas geográficas 23°21'44,4"S e 52°05'11,7"W. O local possui embasamento rochoso da Formação Caiuá constituída principalmente por arenito finos e muito finos e caracterizada fortemente pela presença de quartzo. Este solo tem a areia como principal fração granulométrica sendo classificado como areia siltosa (Gonçalves *et al.*, 2018).

Já o solo de Santa Maria, cidade localizada no estado do Rio Grande do Sul, foi coletado a profundidade de 30 cm em uma área de estudo conhecida como Voçoroca Buraco Fundo, com aproximadamente 300 m de extensão e 180 m de largura. A jazida de coleta das amostras encontra-se em uma feição erosiva entre as coordenadas 29° 45' 57"S e 29° 46' 02" latitude sul; 54° 00' 35" e 54°O e 54° 00' 27" longitude oeste, na margem direita do arroio Sarandi.

A região onde está inserida a voçoroca faz parte da província geomorfológica denominada Depressão Periférica Sul-Riograndense que, de acordo com Werlang (2004), apresenta em determinadas áreas colinas e encostas onde podem ocorrer processos erosivos de ordem natural ou acelerada.

As amostras de ambos os solos foram do tipo deformadas. A Figura 1 apresenta imagem das amostras de solo de Mandaguçu e de Santa Maria.

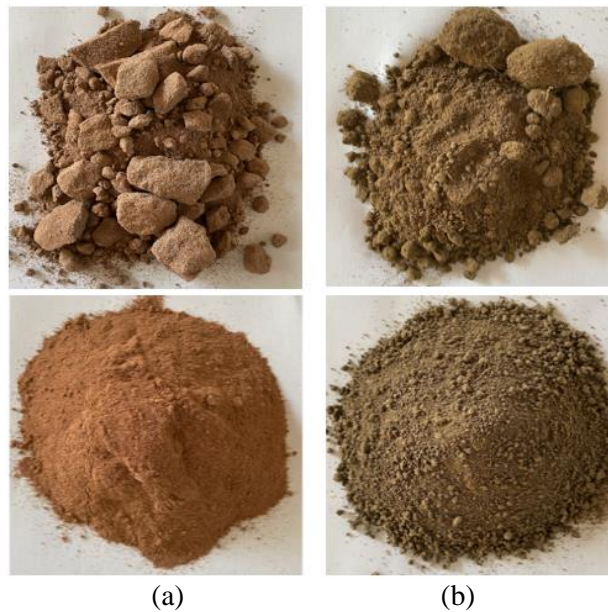


Figura 1. Amostras de solo de Mandaguçu (a) e Santa Maria (b) antes e após destorroamento.

2.2 Fibras de PET

A Figura 2 apresenta 1g da fibra PET utilizada no presente estudo, a qual possui título de 1,4 dtex e 32 mm de comprimento. O peso específico da fibra, determinada por picnômetro automático a gás, é de 1,21 g/cm³, apresentando resistência à tração de 81 MPa, módulo de elasticidade de 2.800 MPa e alongamento na ruptura de 70% (Ferreira *et al.*, 2021).



Figura 2. Fibra de PET

2.3 Ensaios de Caracterização Física dos Solos

Para a determinação das propriedades físicas dos solos foram executados ensaios de análise granulométrica por sedimentação e peneiramento (NBR 7181/2016), massa específica real dos grãos (NBR 6458/2016), limite de liquidez (NBR 6459/2017) e limite de plasticidade (NBR 7180/2016). Os parâmetros de compactação foram obtidos pelo ensaio de compactação (NBR 7182/2020), sem reuso de material e com as amostras secas até a umidade higroscópica.

2.4 Compactação dos Corpos de Prova

A compactação dos corpos de prova seguiu os preceitos da NBR 7182 (ABNT, 2016). Foram moldados corpos de prova 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.

2.5 Permeâmetro de Carga Variável

Para os ensaios de permeabilidade foram utilizados permeâmetros de metal operando de maneira simultânea, um com corpo de prova do solo puro compactado e outro da mistura com fibras compactado, ambos do mesmo solo. Dessa forma, as leituras foram iniciadas ao mesmo tempo e, ao final dos ensaios, já era possível avaliar alguma alteração no coeficiente de permeabilidade (k) entre os corpos de prova.

Os permeâmetros utilizados nos ensaios, apresentados na Figura 3a, possuem altura h de 17,8 cm e diâmetro interno (D_i) de 15,2 cm com reservatórios de água graduados (bureta), conectados às entradas de água de cada aparelho. Os corpos de prova ensaiados foram posicionados nos permeâmetros seguindo esquema apresentado na Figura 3b.

Antes de iniciar cada leitura, a temperatura da água foi medida utilizando-se um termômetro de mercúrio.

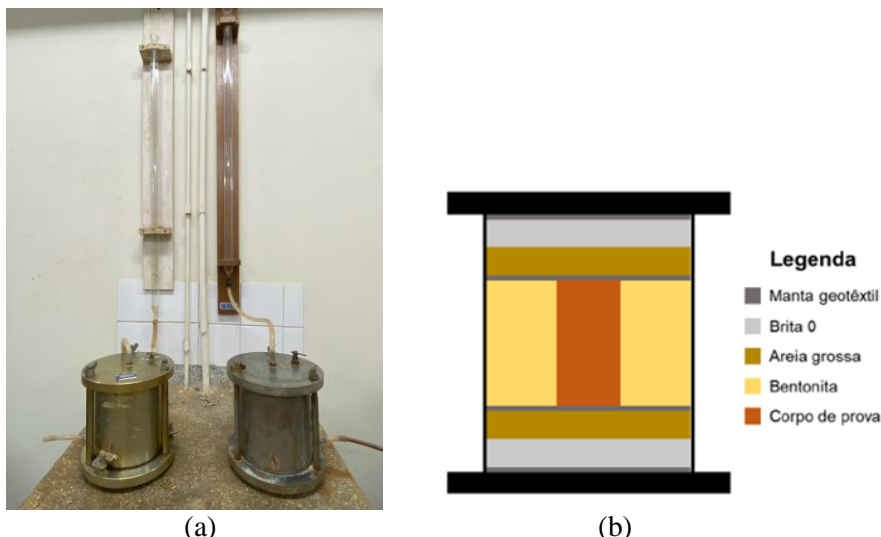


Figura 3. Permeâmetros de carga variável: a) em ensaio; b) corte esquemático.

Os ensaios de permeabilidade foram conduzidos de acordo com a NBR 14545/2021 – Método B, para permeâmetros de carga variável e parede flexível. Prévio ao início das leituras, foi realizada a saturação dos corpos de prova. Para isto, foi feita a passagem de água por dois dias com as mangueiras abertas, garantindo a expulsão do ar contido nos permeâmetros.

Após saturação do corpo de prova, o reservatório foi preenchido até a marca de 80 cm e a saída de água foi liberada. As leituras foram feitas com intervalos de mais de 24h entre h_0 (altura inicial da coluna d'água) e h_1 (altura final da coluna d'água) devido ao tempo de percolação lento da água, uma vez que os corpos de

prova foram compactados para atingir os parâmetros de umidade ótima ($\omega_{ót}$) e massa específica seca máxima ($\gamma_{d\ máx}$). A temperatura da água foi medida junto com a leitura da altura final de um ciclo de rebaixamento.

No total, foram realizadas 14 leituras para cada corpo de prova, a fim de se obter média representativa do coeficiente de permeabilidade k das amostras ensaiadas.

2.6 Porosímetro

Os ensaios de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio foram realizados utilizando o porosímetro AutoPore 9500 da empresa Micromeritics. As medidas foram realizadas com baixa pressão (pressões variando de 1 psi a 30 psi) e com alta pressão (pressões variando de 30 psi até 35000 psi) em subamostras de formato cúbico, com aproximadamente 1 cm de aresta. As subamostras foram coletadas dos corpos de prova compactados, com e sem fibras, de ambos os solos.

Para cada torrão de corpo de prova, solo puro e misturas com fibras, foram medidos 60 pontos de pressão, sendo que o tempo de estabilização de cada ponto foi de 300 s. O equipamento realiza cada leitura em triplicata, fornecendo no fim a média das três leituras como valor final, para cada ponto de pressão, sendo os resultados de porosimetria tratados estatisticamente a um nível de significância (α) de 0,05.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização Física

As Tabela 1 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização física para o solo de Mandaguaçu e Santa Maria. De acordo com a classificação pelo Sistema Unificado de Classificações de Solos – SUCS (ASTM 2487/2006), amostra de solo de Mandaguaçu foi classificada como uma areia argilosa (SC - *clayey sand*) e a amostra de solo de Santa Maria foi classificada como uma argila arenosa (CL com areia - *sandy lean clay*).

A diferença entre a classificação textural do solo de Santa Maria e sua classificação SUCS se deve ao fato deste solo ser de uma camada de transição de região de clima tropical, o que resulta em divergência de classificação ao se utilizar a classificação SUCS, essencialmente desenvolvida para solos de clima temperado.

Tabela 1. Caracterização física e parâmetros de compactação dos solos estudados

Solo	Índices Físicos				Compactação		Granulometria				
	γ_s (g/cm ³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	$\gamma_{d\ máx}$ (g/cm ³)	$\omega_{ót}$ (%)	Areia Grossa (%)	Areia Média (%)	Areia Fina (%)	Silte (%)	Argila (%)
Mandaguaçu	2,69	27	17	10	1,87	13,7	0	37	40	9	14
Santa Maria	2,59	41	29	12	1,66	16,8	4	20	26	33	17

3.2 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM)

Analisando as curvas de distribuição dos poros dos solos puros e misturas de Mandaguaçu e Santa Maria na Figura 4, é possível observar que a inclusão das fibras PET nos solos ensaiados, para o teor de 0,3% de adição de fibra, apresentou mudanças na distribuição dos poros das misturas.

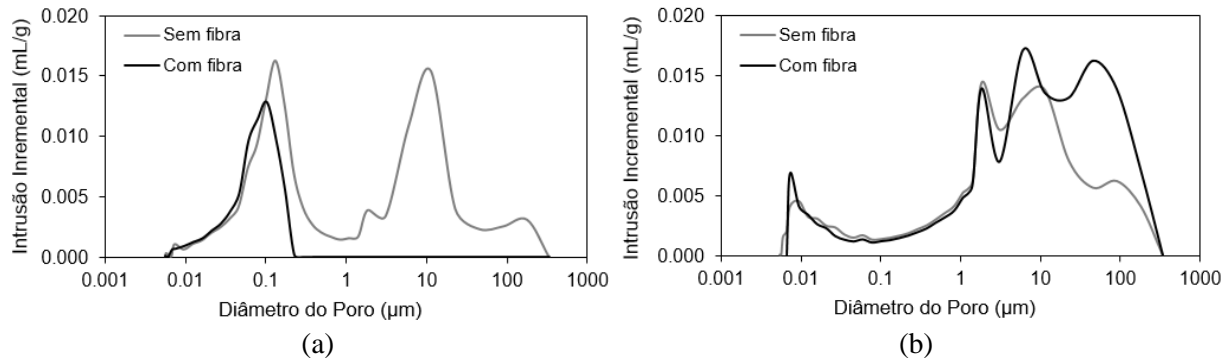


Figura 4. Distribuição dos poros dos solos puros e misturas com fibras PET: a) Mandaguaçu; b) Santa Maria

Para o solo de Santa Maria (Fig. 4b), observa-se tendência bimodal de distribuição do tamanho dos poros, concentradas aproximadamente em 0,01 e 10 μm . Além disso, observa-se que a inclusão das fibras aumentou tanto a quantidade de microporos quanto de macroporos, sendo esta última bem mais significativa. Os dados obtidos vão de acordo com diversos trabalhos publicados na literatura (Hoare, 1979; Maher & Ho, 1994; Bueno *et al.*, 1996; Miller & Rifai, 2004) que também observaram que a inserção de fibras no solo tende a aumentar a porosidade da mistura, mesmo compactada.

O solo de Mandaguaçu (Fig. 4a) também apresentou tendência de distribuição bimodal, com poros concentrados em 0,1 e 10 μm , considerando a condição experimental sem fibras. No entanto, ao contrário do que se observou com a inclusão das fibras no solo de Santa Maria, a inserção dos agentes de reforço neste solo diminuiu a quantidade de microporos, além de reduzir a zero a quantidade de macroporos da mistura.

Considerando que os dois solos são arenosos, acredita-se que a diferença de comportamento demonstrado na porosimetria a partir da inserção de fibras PET esteja associada ao grau de evolução pedogenética de cada solo. O solo de Mandaguaçu sofreu elevado grau de intemperismo químico, resultando em satisfatória interação entre a matriz e o reforço utilizado. Para o solo de Santa Maria, por ser uma camada de solo transicional, apresenta características mais próximas aos solos de países de clima temperado, fazendo com que o comportamento experienciado, isto é, o aumento dos poros, se aproxime da tendência observada pela literatura tradicional oriunda de solos do hemisfério norte.

3.3 Ensaios de permeabilidade

A Tabela 2 resume os valores médios de coeficiente de permeabilidade obtidos para temperatura da água a 20 °C, bem como o índice de vazios (e) considerando ambos solos com e sem adição de fibras de PET.

Tabela 2. Coeficiente de permeabilidade k e índice de vazios e dos solos puros e reforçados.

Amostra	$k_{\text{médio}}$ (cm/s)	e
Mandaguaçu sem fibras PET	$9,25 \times 10^{-7}$	0,43
Mandaguaçu com fibras PET	$6,05 \times 10^{-7}$	0,41
Santa Maria sem fibras PET	$2,83 \times 10^{-7}$	0,54
Santa Maria com fibras PET	$3,65 \times 10^{-7}$	0,55

A partir dos resultados obtidos, nota-se que não foi observada alteração na ordem de grandeza do coeficiente de permeabilidade dos solos reforçados quando comparadas aos solos puros. Dada a estrutura compactada e baixo valor de coeficiente de permeabilidade de ambos solos na condição pura, pressupõe-se que as fibras afetam a distribuição de poros, observadas pelos valores de k , de 9,25 para 6,05 no solo de Mandaguaçu e 2,83 para 3,65 no solo de Santa Maria, porém, sem produzir efeitos globais (ordem de grandeza do k de 10^{-7} cm/s), já que os solos reforçados permanecem na condição compactada e com índices de vazios parecidos.

Entende-se como benéfico a não alteração do coeficiente de permeabilidade dos solos com a inserção das fibras, visto que não produz alterações nas condições de projeto quando se compara o solo puro com o solo-fibra compactados, somados aos ganhos de comportamento mecânico com a inclusão de fibras.

4 CONCLUSÕES

Os resultados dos coeficientes de permeabilidade obtidos para os corpos de prova, com e sem adição das fibras de PET, de ambos os solos estudados, mostram que a inclusão de 0,3% de fibras PET não provoca alterações na grandeza do coeficiente de permeabilidade.

Ao observar a microestrutura de cada condição experimental, nota-se que a inclusão das fibras PET no solo de Mandaguaçu reduziu os micro e macroporos da mistura, o que atribui-se ao grau de evolução pedológica mais acentuado. Para o solo de Santa Maria, observou-se que a adição das fibras aumentou os macroporos da mistura, fator associado ao menor grau de intemperismo sofrido pelo solo, o qual apresentou tendência semelhante ao observado no reforço de solos de clima temperado.

Ainda assim, as diferenças geradas na microestrutura de cada solo com a adição das fibras não foram suficientes para impactar o coeficiente de permeabilidade, predominando, portanto, o efeito da compactação.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial ao Laboratório de Física Nuclear Aplicada da UEL (LFNA) pelas análises de porosimetria e à empresa Ecofabril por ter cedido as fibras de PET utilizadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180. *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 6459. *Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). 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 (2018). NBR 7181. *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 7182. *Solo - Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 14545. *Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável*. Rio de Janeiro.
- ASTM International (2006). ASTM D2487: *Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)*.
- Botero, E., Ossa, A., Sherwell, G., Shelley-Ovando, E. (2015). Stress-strain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET). *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 43, p. 363-369.
- Bueno, B. S., Lima, D. C., Teixeira, S. H. C., Ribeiro, N. J. *Soil fiber reinforcement: basic understanding*. In: International Symposium on Environmental Geotechnology, San Diego, v.1, p. 878-884.
- Correia, A. A. S., Oliveira, P. J., Custódio, D. G. (2015). Effect of polypropylene fibres on the compressive and tensile strength of a soft soil, artificially stabilised with binders. *Geotextiles and Geomembranes*, 43, nº 2, pp. 97-106.
- Cristelo, N., Cunha, V. M. C. F., Dias, M., Gomes, A. T., Miranda, T., Araújo, N. (2015). Influence of discrete fibre reinforcement on the uniaxial compression response and seismic wave velocity of a cement-stabilised sandy-clay. *Geotextiles and Geomembranes*, v.43, p. 1-13.
- Diambra, A., Ibraim, E., Wood, M. D., Russel, A. R. (2010). Fibre reinforced sands: Experiments and modelling. *Geotextiles and Geomembranes*, v.28, p. 238-250.
- Ferreira, J. W. S., Senez, P. C., Casagrande, M. D. T. (2021). PET fiber reinforced sand performance under triaxial and plate load tests. *Case Studies in Construction Materials*, vol. 15.

- 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.
- Hoare, D. J. (1979). *Laboratory study of granular soils reinforced with randomly oriented discrete fibres*. In: International Conference on Soil Reinforcement, Paris, v.1, p. 47-52.
- Maher, M. H., Ho, Y. C. (1994). Mechanical properties of kaolinite fiber soil composite. *Journal of Geotechnical Engineering*, v.120, nº8.
- Miller, C. J., Rifai, S. M. (2004). Fiber Reinforcement for Waste Containment Soil Liners. *Journal of Environmental Engineering*, v. 130, p. 891-895.
- Palmeira, E. M. (1992). Geossintéticos: tipos e evolução nos últimos anos. Seminário Sobre Aplicações De Geossintéticos em Geotecnia. *Geossintéticos*, Brasília, p.1-20.
- Senez, P. C. (2016). *Comportamento de uma areia reforçada com fibras de Polietileno Tereftalato (PET)*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro / PUC-RIO, 124 p.
- Silva, C. C. (2007). *Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânicos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná / UFPR, 156 p.
- Werlang, M. K. (2004). *Configuração da rede de drenagem e modelado do relevo: conformação da paisagem na zona de transição da Bacia do Paraná na Depressão Central do Rio Grande do Sul*. Tese de Doutorado em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria / UFSM, 191 p.