

Análise do Comportamento Carga-Recalque de uma Areia Reforçada com Fibras de Politereftalato de Etileno (PET) Submetidas a Ensaio de Placa em Modelo Físico Reduzido

Phillipe Campello Senez
PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, phill.senez@gmail.com

Michéle Dal Toé Casagrande
PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, michele_casagrande@puc-rio.br

RESUMO: O presente estudo tem como principal objetivo demonstrar que fibras derivadas da reciclagem de material PET podem ser uma boa alternativa, tanto economicamente quanto ambientalmente viável, se utilizadas como reforço de solos submetidos a diferentes níveis de carga. Para o programa experimental deste trabalho foram realizados ensaios para avaliar a caracterização física e o comportamento mecânico de uma areia mal graduada reforçada com a adição de fibras PET distribuídas aleatoriamente na massa de solo, com diferentes títulos e comprimentos (1,4 dtex com 38 mm e 3,3 dtex com 56 mm), ambas no teor de 0,5% em relação ao peso do solo seco, visando a aplicação do solo reforçado como base de fundações superficiais, taludes e camadas de aterros sanitários e aterros sobre solos moles, por exemplo. Foram realizados ensaios de placa em modelo físico reduzido com a finalidade de analisar o comportamento carga-recalque dos compósitos. Observou-se que a areia reforçada com fibras PET apresentou uma maior capacidade de suporte além da redução dos recalques se comparado com o solo não reforçado. Ressalta-se o emprego positivo das fibras PET para aplicação em obras onde o solo local não seja adequado e o reforço do mesmo seja viável, além de eliminar problemas atuais de disposição de resíduos em lixões, aterros sanitários e até mesmo diretamente na natureza, dando um fim mais nobre a este material que por muitos é visto como um vilão ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Solo Reforçado, Fibras PET, Ensaio de Placa, Comportamento Carga-Recalque, Modelo Reduzido.

1 INTRODUÇÃO

A introdução da embalagem PET no mercado mundial teve início na década de 70 e trouxe diversos benefícios ao consumidor e ao produtor. No entanto, junto com estes benefícios vieram grandes problemas, principalmente os relacionados ao meio ambiente, no que se diz respeito à adequada disposição final dos resíduos PET. Milhares de toneladas de garrafas PET são produzidas e descartadas anualmente no Brasil e no mundo e a cada ano que passa estes números tendem a um maior crescimento. Por ser um material inerte e prejudicial ao meio ambiente em virtude da sua disposição final, feita de maneira

incorreta e em larga escala por todo o país, com longo tempo de decomposição, pode vir a causar sérios problemas ambientais como poluição da água de rios, perda da biodiversidade e contaminação do lençol freático.

O reforço do solo com fibras é uma técnica antiga (Van Impe, 1989) e consiste em inserir e misturar um material em outro, visando a melhoria das suas propriedades, ou seja, reforçar o solo tem como definição melhorar as características geotécnicas de solos em obras onde o solo local não seja adequado e o reforço do mesmo viável. A escolha pela utilização de fibras como material de reforço, além de procurar uma maneira para agregar mais valor

ao resíduo de PET, se deu por saber que estas contribuem de forma mais efetiva na resistência do solo no estado de pós fissuração (Sotomayor, 2014), gerando um maior aumento na capacidade de absorção de energia do compósito solo-fibra. Isto ocorre porque a deformação necessária para causar as fissuras na matriz do solo é bastante inferior ao alongamento das fibras (Taylor, 1994; Illston, 1994; Hannant, 1994).

Assim, o presente estudo tem como principal objetivo demonstrar, através de ensaios de placa em modelo físico reduzido, que as fibras derivadas da reciclagem de material PET, com título de 1,4 dtex e 38 mm de comprimento e com 0,5% de teor em relação ao peso do solo seco, afetam de maneira positiva o comportamento carga-recalque do solo puro, podendo ser uma boa alternativa se utilizadas como reforço de solos, visando a aplicação do solo reforçado como base de fundações superficiais, taludes e camadas de aterros sanitários e aterros sobre solos moles, por exemplo, além de eliminar problemas atuais de disposição de resíduos em lixões, aterros sanitários e até mesmo diretamente na natureza.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

A areia utilizada neste estudo é proveniente da região Porto das Caixas, localizada no município de Itaboraí, estado do Rio de Janeiro. O solo é classificado, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) como uma areia média, uniforme, mal graduada (SP) e com densidade real dos grãos de 2,65. De acordo com o ensaio granulométrico, os valores encontrados para o diâmetro efetivo foi de 0,24 mm e para os coeficientes de uniformidade e curvatura foram, respectivamente, 2,9 e 1,0. Os índices de vazios máximo e mínimo encontrados foram de 0,93 e 0,67, respectivamente.

Como material de reforço, foram utilizadas neste estudo, fibras poliméricas provenientes da indústria têxtil, 100% confeccionadas com resíduo de politereftalato de etileno, comumente conhecido como PET. As mesmas foram

cedidas pelo Grupo M&G, com título de 1,4 dtex e comprimento de 38mm. Título é a grandeza que representa a espessura dos filamentos das fibras na indústria têxtil, cuja unidade é o dtex (onde 1 dtex = 1g/10000m) (Casagrande, 2005). As fibras PET possuem densidade de 1,27 g/cm³, resistência à tração de 81 MPa, módulo elástico de 2,8 GPa e alongamento até a ruptura de 70%.

2.2 Ensaios de Carga em Placa

O objetivo da realização dos ensaios de carga em placa foi estruturado em analisar como que as fibras de PET, sendo utilizadas como reforço, influenciariam no comportamento carga-recalque da areia, visando principalmente obter uma redução no recalque final. Para a realização destes ensaios foi construído uma caixa de ensaio com três chapas de madeira de alta densidade e uma chapa de acrílico resistente. A caixa foi dimensionada segundo o critério de que o bulbo de pressões gerado pelo ensaio de placa somente representa as características do solo até dois diâmetros abaixo da placa (Terzaghi e Peck, 1967). Assim, para simular um meio contínuo e sem interferência das paredes laterais e do fundo, definiu-se dimensões para a caixa de 80 cm de comprimento x 63 cm de largura x 45 cm de espessura. As espessuras das chapas de madeira, feitas em compensado naval, e do acrílico foram de 30 mm e 20 mm, respectivamente. Para evitar problemas de flambagem das paredes, foi adicionado um reforço lateral composto por perfis de aço de 1", garantindo à caixa uma maior rigidez ao aplicar o carregamento. Para realizar os ensaios de placa, utilizou-se uma placa rígida circular, com diâmetro de 10 cm e 1" de espessura. Esta era acoplada no sistema de carregamento, um pórtico MTS com aplicação de carga de até 10 ton, com um sistema de aquisição de dados tanto para a carga a ser aplicada quanto para a placa a ser acoplada na célula de carregamento. Para medir os deslocamentos obtidos durante a realização dos ensaios de placa, foram utilizados três transdutores de deslocamento do tipo Gefran, com curso de 100 mm e série NI9205. Todos os transdutores foram calibrados

previamente a realização dos ensaios. A posição para cada transdutor foi definida em 5 cm, 7,5 cm e 10 cm distantes da borda da placa, para a medição dos recalques ao redor da placa. Com esses transdutores medindo o comportamento do solo ao redor da placa durante o carregamento, espera-se poder avaliar melhor os mecanismos de ruptura entre os ensaios.

A Figura 1 apresenta o esquema proposto para a construção do modelo reduzido.

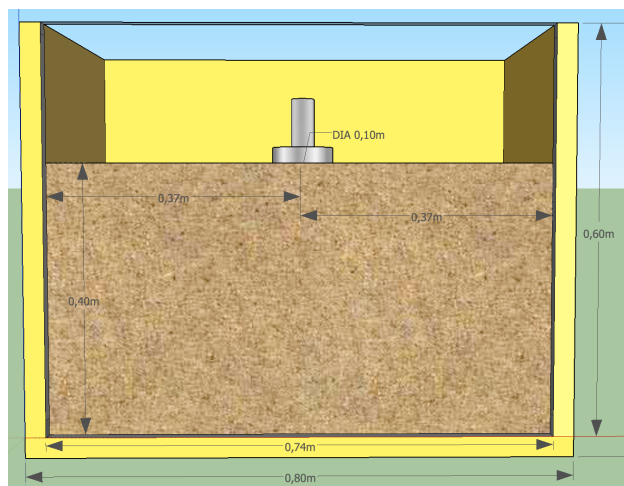


Figura 1 – Esquema para construção do modelo reduzido.

2.3 Preparação dos Ensaios

Após secagem ao ar, a areia foi disposta em sacos plásticos hermeticamente fechados, evitando assim mudanças nos teores de umidade do solo, até o momento em que foi utilizada na preparação dos ensaios.

Para o compósito areia-fibra, foram definidos parâmetros de umidade de 10% e densidade relativa de 50% e um teor de fibras PET de 0,5% em relação ao peso seco do solo. Estes parâmetros escolhidos foram fundamentados em outras pesquisas já desenvolvidas, tanto com fibras sintéticas quanto vegetais (Casagrande, 2005; Sotomayor, 2014; Louzada, 2015; e Tamayo, 2015), tendo assim parâmetros para futuras comparações. Além deste motivo, a densidade relativa de 50% também foi escolhida por se ter uma melhor trabalhabilidade entre solo e fibra.

Para se ter uma melhor modelagem e para se obter a densidade relativa definida, dividiu-se as paredes internas da caixa em 4 camadas de 10 cm cada. Assim, foi possível calcular a

quantidade de material necessário para cada camada, respeitando a densidade relativa estipulada. Caso a areia ficasse abaixo deste nível de controle, seria necessário repetir o processo, pois se teria uma densidade relativa acima dos 50% desejados. Caso contrário, uma compactação adicional seria necessária para nivelar o material.

A Figura 2 apresenta a caixa de ensaio e o pórtico a ser realizado o ensaio para o compósito areia-fibra.



Figura 2 - Caixa de ensaio para o compósito areia-fibra instrumentada.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

A adição de fibras PET à matriz da areia gera uma mudança expressiva no comportamento carga-recalque do solo, sendo capaz de suportar quase o dobro de carga com um menor recalque, se comparado ao solo puro.

A Figura 3 apresenta as curvas carga-recalque obtidas para a areia e para o compósito areia-fibra.

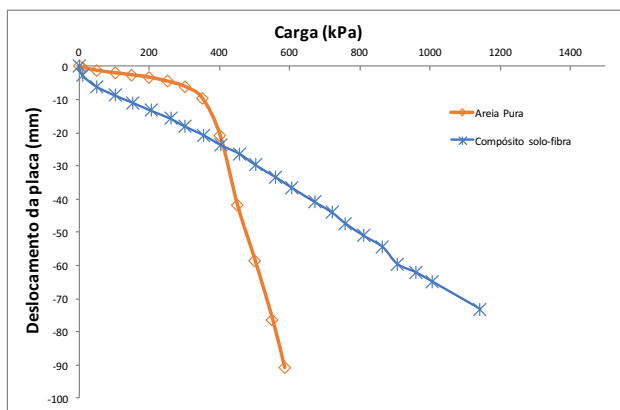


Figura 3 - Curvas carga-recalque obtidas nos ensaios de placa.

A carga máxima registrada no ensaio com a areia foi de 584,16 kPa com um recalque medido de 90,74 mm. Já para o ensaio do compósito, foi registrada uma carga máxima de 1141,64 kPa e um recalque medido de 73,11 mm. Os ensaios foram conduzidos até o limite de aplicação de carga do sistema utilizado.

Nota-se que a areia possui um menor deslocamento do que a mistura de areia com fibra até os 400 kPa. Segundo Sotomayor (2014), isto pode ser causado devido a uma maior compactação da areia sem fibra no momento da conformação das últimas camadas. A densidade relativa de 50% utilizada para o ensaio também pode vir a causar uma perda de rigidez inicial, mas para maiores densidades relativas, o comportamento no início do ensaio seria mais rígido. Após essa tensão de 400 kPa, é visível a mudança no comportamento da curva carga-recalque, ou seja, é neste instante em que a fibra começa a agir. Ou seja, depois de atingida a tensão de ruptura, o compósito areia-fibra ainda resiste às tensões atuantes.

Assim, pode-se afirmar que no início do ensaio quem resiste às tensões é a matriz arenosa e que, ao não suportar mais a tensão atuante e entrar em um estado pós fissuração, as fibras são mobilizadas e começam a trabalhar como reforço.

Analisando os dados obtidos, notou-se, portanto, que a fibra utilizada na mistura diminui o recalque se comparado à areia quando submetida a maiores solicitações de tensões, atingindo uma redução no recalque medido de até 60% se comparado apenas à matriz arenosa. Isto ocorre porque as fibras distribuem melhor as tensões atuantes.

Sotomayor (2014) obteve um resultado próximo

ao encontrado, mas para o reforço do solo com fibra de coco dispostas em manta. O fato da fibra PET utilizada na presente pesquisa ser mais fina e mais volumosa pode ser uma explicação para este comportamento. Para um mesmo teor, a fibra PET se comportou mais como um geossintético do que de maneira aleatória.

A Figura 4 e a Figura 5 apresentam os registros dos transdutores ao redor da placa para os ensaios da areia e do compósito areia-fibra, respectivamente.

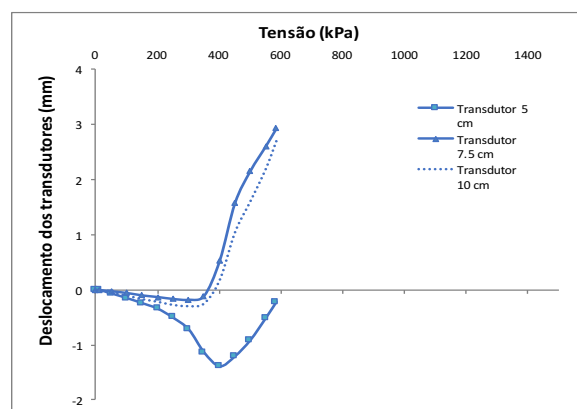


Figura 4 - Registro dos transdutores para o ensaio da areia.

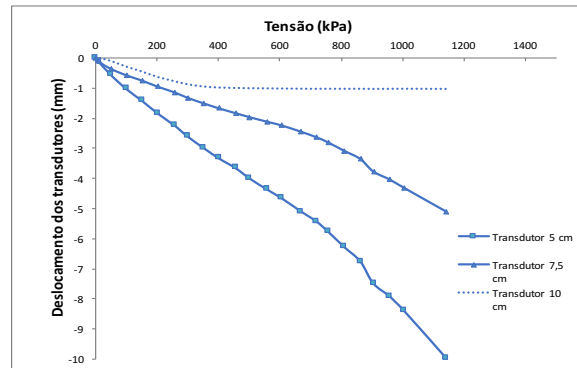


Figura 5 - Registro dos transdutores para o ensaio do compósito solo-fibra.

É possível definir, para a areia, que ocorre um caso de ruptura localizada, onde se forma uma cunha abaixo da fundação e se tem uma notável tendência de levantamento do solo ao redor da fundação. Já para o compósito solo-fibra, ocorre uma ruptura por puncionamento, onde o movimento vertical da fundação é acompanhado pela compressão do solo imediatamente abaixo e o solo ao redor, praticamente não participa do processo. Estes fatos podem ser comprovados analisando as leituras obtidas para os transdutores de

deslocamento dispostos ao redor da placa.

Uma explicação para a mudança de ruptura pode estar ligado à maneira como os grãos de areia se unem as fibras, gerando uma certa coesão aparente ao solo, produzindo um acréscimo na resistência ao deslocamento do solo puro. Assim, a tensão aplicada que era transmitida diretamente para a areia, pode ser dissipada e transmitida na massa do compósito areia-fibra, prevenindo a ruptura localizada.

A Figura 6 e Figura 7 apresentam os mecanismos de ruptura obtidos para os ensaios da areia e do compósito, respectivamente.



Figura 6 - Ruptura encontrada para o ensaio da areia.



Figura 7 - Ruptura encontrada para o compósito solo-fibra.

As fissuras originadas no ensaio da areia aparecem de maneira perpendicular à placa. Já as fissuras obtidas no ensaio da mistura são circulares e se concentram no entorno da placa, efeito causado pela distribuição uniforme das tensões aplicadas.

Estes mecanismos de ruptura tanto para a areia quanto para o compósito coincidem com resultados obtidos por outros pesquisadores tanto para solos reforçados com fibras sintéticas de polipropileno (Casagrande, 2005; e Donato, 2007) quanto para solos reforçados com fibras

naturais de coco (Sotomayor, 2014).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As seguintes conclusões relacionadas ao comportamento carga-recalque podem ser obtidas dos ensaios de placa realizados para a areia e areia com fibras PET:

- A adição de fibras PET à matriz arenosa colabora para um aumento na resistência, diminuindo os recalques medidos em até 60%, que pode ser verificado pelas curvas de carga-recalque;
- Ocorre uma mudança no mecanismo de ruptura, onde para a areia se obteve uma ruptura localizada e para o compósito solo-fibra uma ruptura por puncionamento;
- As fibras começam a se mobilizar em um estado de pós fissuração da matriz arenosa, quando este não consegue mais resistir as cargas aplicadas;
- As fibras trabalham por tração, o que causa o efeito de travar os grãos do solo e impedir a propagação das fissuras.
- Os resultados obtidos se aproximam de resultados encontrados em outra pesquisa, mas para a fibra disposta em manta. O menor diâmetro e o maior volume da fibra PET pode ser uma explicação.
- A análise geral dos resultados obtidos comprova o fato de que as fibras PET podem ser utilizadas como reforço de solo, melhorando a sua capacidade de carga e reduzindo os recalques se comparado apenas à areia.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio pela disponibilidade do espaço e dos equipamentos para realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS

- Casagrande, M.D.T. (2005) *Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações*, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 219 p.
- Donato, M. (2007) *Medidas diretas de tensão em solo reforçado com fibras de polipropileno*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 162 p.
- Hannant, L. (1994) *Polymers and Polymers Composites*, 2nd ed., J.M. Illston/E & FN Spon, London, p.359-403.
- Illston, J.M. (1994) *Construction Materials; their Nature and Behavior*, 2nd ed., E & FN Spon, London, 518 p.
- Louzada, N.S.L. (2015), *Experimental study of soils reinforced with crushed polyethylene Terephthalate (PET) residue*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 127 p.
- Sotomayor, J.M.G. (2014) *Avaliação do comportamento carga-recalque de uma areia reforçada com fibra de coco submetida a ensaios de placa em verdadeira grandeza*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 132 p.
- Tamayo, J.R.A (2015) *Análise do comportamento mecânico de um solo arenoso reforçado com fibras de coco*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 114 p.
- Taylor, G.D. (1994) *Materials in Construction*, 2nd ed., Longman Scientific & Technical, London, 284 p.
- Terzaghi, K. e Peck, R.B. (1967) *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd ed., John Wiley and Sons, New York.
- Van Impe, W.F.V. (1989) *Soil Improvement Techniques and their Evolution*, A.A. Balkema, Rotterdam, 125 p.