



**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO EM CAMPO DE SOLO
REFORÇADO COM FIBRAS DE PET PARA BASES DE
RADIER**
**EVALUATION OF BEHAVIOR IN SOIL FIELD REINFORCED WITH PET
FIBERS FOR MAT FOUNDATIONS**

**EVALUACIÓN DE COMPORTAMIENTO EN CAMPO DE SUELOS
REFORZADOS CON FIBRAS DE PET PARA LOSA DE CIMENTACION**

FREITAS, João Henrique de ¹
POLASTRI, Paula²
DE ANGELIS NETO, Generoso ³
BELINCANTA, Antonio ⁴
REIS, Jeselay Hemetério Cordeiro dos ⁵

¹ Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Civil. Maringá, Paraná, Brasil.
joaohenriquedefreitas@gmail.com / jhfreitas2@uem.br
ORCID: 0000-0001-6927-3558

² Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Química, Pós-graduação em Engenharia Química.
Maringá, Paraná, Brasil.
paulapolastri1983@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0785-6517

³ Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Civil, Gestão de Resíduos da Construção Civil.
Maringá, Paraná, Brasil.
ganeto@uem.br
ORCID: 0000-0002-2592-3608

⁴ Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Civil. Maringá, Paraná, Brasil.
abelincanta@hotmail.com
ORCID: 0000-0001-9982-0989

⁵ Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Civil. Maringá, Paraná, Brasil.
jeselay@gmail.com/ jhcreis@uem.br
ORCID: 0000-0001-6196-2607

Recebido em 02/06/2020 Aceito em 29/11/2020



Resumo

Atualmente, o uso de radier em edificações de pequeno porte tem se intensificado, no entanto, essa alternativa não pode ser usada em solos de baixa capacidade de carga. Uma alternativa é a de se promover uma melhoria ou reforço da camada de base. Para tanto, este trabalho faz-se uma avaliação do comportamento mecânico de um solo arenoso fino reforçado com fibras de tereftalato (PET) para uso como base de radier. Foram usados modelos de reforço executados em campo com camadas de 300 mm de espessura de solo compactado nas condições ótimas de compactação reforçado com 1 % de fibras de PET. Avaliação do desempenho foi feita usando ensaios de provas de carga estática em placa circular de 340 mm de diâmetro. Foram realizados ensaios em três condições: solo reforçado com fibra, Solo compactado sem reforço e no solo natural. Os resultados mostraram que a adição de fibra melhora a capacidade de carga, aumenta a rigidez, diminuindo os deslocamentos para as cargas de serviço, sendo que a superfície de ruptura mobiliza uma maior região. Conclui-se que a adição de fibra melhora o desempenho da camada de base, apresentando ganho de capacidade de carga, no entanto, esse ganho ocorre para grandes deslocamentos.

Palavras-Chave: Fibra de polietileno tereftalato (PET); Capacidade de suporte; Deslocamentos.

Abstract

Currently, the use of mat foundations in small buildings has intensified, however, this alternative cannot be used in soils with low load capacity. An alternative is to promote an improvement or reinforcement of the base layer. For this purpose, this work is an evaluation of the mechanical behavior of a fine sandy soil reinforced with terephthalate (PET) fibers for use as a mat foundations base. Reinforcement models performed in the field with layers of 300 mm thick compacted soil were used in the optimal conditions of compaction reinforced with 1% PET fibers. Performance evaluation was performed using static load tests on a 340 mm diameter circular plate. Tests were carried out in three conditions: soil reinforced with fiber, soil compacted without reinforcement and natural soil. The results showed that the addition of fiber improves the load capacity, increases the rigidity, decreasing the displacements for the service loads, and the rupture surface mobilizes a larger region. It is concluded that the addition of fiber improves the performance of the base layer, presenting a gain in load capacity, however, this gain occurs for large displacements.

Key-Words: Polyethylene terephthalate fiber; Load capacity; Displacements.

Resumen

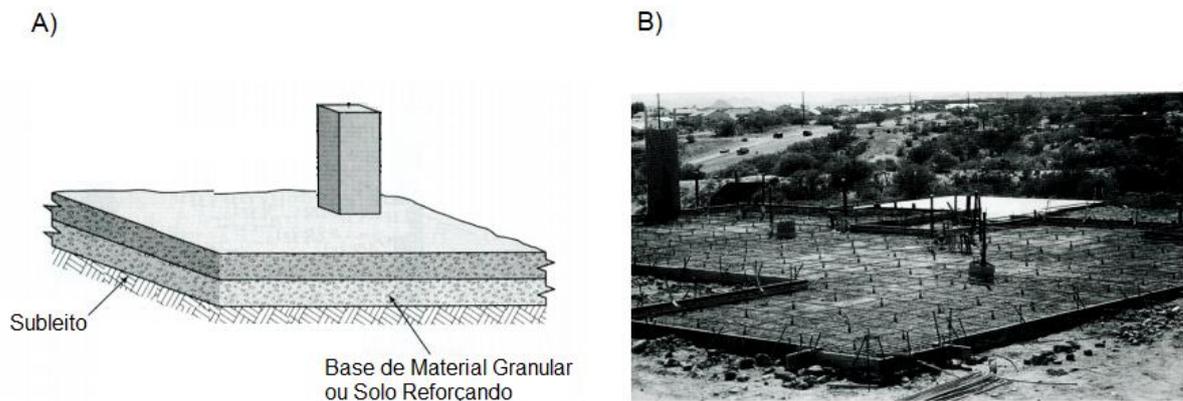
Actualmente se ha intensificado el uso de losa de cimentación en pequeñas edificaciones, sin embargo, esta alternativa no se puede utilizar en suelos con baja capacidad de carga. Una alternativa es promover una mejora o refuerzo de la capa base. Para ello, este trabajo es una evaluación del comportamiento mecánico de un suelo arenoso fino reforzado con fibras de tereftalato (PET) para su uso como base de losa de cimentación. Se utilizaron modelos de refuerzo realizados en campo con capas de suelo compactado de 300 mm de espesor en las condiciones óptimas de compactación reforzado con fibras de PET al 1%. La evaluación del rendimiento se realizó mediante pruebas de carga estática en una placa circular de 340 mm de diámetro. Los ensayos se realizaron en tres condiciones: suelo reforzado con fibra, suelo compactado sin refuerzo y suelo natural. Los resultados mostraron que la adición de fibra mejora la capacidad de carga, aumenta la rigidez, disminuye los desplazamientos para las cargas de servicio y la superficie de ruptura moviliza una región más grande. Se concluye que la adición de fibra mejora el desempeño de la capa base, presentando una ganancia en capacidad de carga, sin embargo, esta ganancia se da para grandes desplazamientos.

Palabras clave: Fibra de tereftalato de polietileno (PET); capacidad de carga; desplazamientos.

1. Introdução

De acordo com a ABNT NBR 6122 (2019), os radiers são definidos como elementos de fundação rasa dotado de rigidez para receber e distribuir mais do que 70 % das cargas de uma estrutura. O radier deve ser projetado de tal modo a possuir uma estrutura de múltiplas camadas usando materiais com rigidez para distribuir as cargas da estrutura para o maciço de solos, sendo muitas vezes, necessário o uso de camadas de base e/ou sub-base (Figura 1).

Figura 1: Radier: a) esquema estrutural base e subleito (solo natural); b) vista de um radier em execução.



Fonte: BUDHU (2015)

Os radiers são classificados como fundações rasas e são formados de uma placa ou laje de concreto armado apoiadas em camadas de substrato com capacidade de suporte adequadas, devendo em seu projeto se levar em consideração as características geomecânicas dos materiais de base para que se garanta a segurança contra a ruptura e contra deslocamentos excessivos que possam introduzir danos na estrutura.

Quando a camada de assentamento não apresenta capacidade de suporte suficiente para absorver os esforços e garantir a segurança contra ruptura (Estado Limite Último - ELU) ou contra deslocamentos excessivos (Estado Limite de Serviço - ELS), faz-se necessário a execução de camada de base ou sub-base ou, ainda, camada de reforço do solo.

Nessas camadas se procura usar materiais com propriedades de compressibilidade, resiliência, capacidade de suporte e expansão compatíveis com o nível de cargas e a distribuição de pressões na placa, sendo, na maioria das vezes, executadas com materiais granulares obtidos da britagem de rocha. No entanto, em regiões com escassez de materiais britados, as camadas de base e sub-base podem ser executadas utilizando materiais alternativos que possuam desempenho compatível.

Em muitos casos, tem se optado pelo uso do solo do próprio local estabilizado com aglomerante hidráulico ou reforçados com a introdução de inclusões que promovam a ancoragem das partículas, melhorando sua rigidez e sua capacidade de suporte.

Existem hoje diversas possibilidades de reforço de solos com inclusões, dentre as quais se destacam a incorporação de fibras de materiais geossintéticos, tiras metálicas ou fibras naturais. Estas fibras promovem a ancoragem do solo de forma a distribuir e a absorver as tensões de tração, melhorando assim seu comportamento mecânico (CORREIA et al., 2015; KUMAR e GUPTA, 2016; ANGGRAINI et



al., 2017).

O reforço de solo unicamente com a adição de fibras é possível quando a fração de areia do solo é muito superior à fração de finos de modo a conferir uma boa resistência ao atrito. Nota-se que a inclusão de fibras em matriz de solo diminui sistematicamente a expansão do solo por umedecimento (AMIN et al., 2018).

Em suas pesquisas Sharma e Kumar (2017) identificaram que a densidade relativa influencia significativamente na capacidade de carga de camadas de solos reforçados com fibras distribuídas aleatoriamente.

No que diz respeito aos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo reforçado, Jiang et al. (2010) observaram um aumento da coesão e do ângulo de atrito em função do aumento do teor de fibra, no entanto, esse aumento é limitado a um teor crítico de fibra a partir do qual esses parâmetros são reduzidos.

De acordo com Li et al. (2018), a adição de fibra como reforço em camadas de base e sub-bases promove a mobilização de resistência a tração na camada reforçada, tornando a ruptura mais dúctil e possibilitando a ocorrência de uma resistência residual de tração.

By et al. (1994) também observou que a inclusão de fibras distribuídas aleatoriamente aumentou significativamente o pico de resistência à compressão, a ductibilidade e a resistência à tração.

A inclusão de fibras de polipropileno em camadas de solo reforçado também promoveu um aumento no Índice de Suporte Califórnia (CBR). Vale destacar que a melhora na capacidade de suporte depende do tipo de fibra e do tipo de solo (JAMSAWANGA et al., 2018; LIMA NETO et al., 2016).

Segundo Chen et al. (2015), a rigidez relativa entre a fibra e a matriz de solo promove um composto muito extensível, necessitando, portanto, de grandes deslocamentos para mobilizar a resistência a tração da fibra.

Em estudos do comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno submetidos a grandes deslocamentos, Casagrande (2005) concluiu que a adição de fibras influenciou o comportamento compressivo da areia, aumentou os parâmetros de resistência ao cisalhamento de pico e pós-pico das matrizes estudadas.

Vendruscolo (2003) realizou um estudo no qual avaliou o efeito do comprimento da fibra usando ensaios triaxiais. Como resultado esse autor identificou que o aumento do comprimento da fibra está associado a diminuição do teor de fibra, principalmente quando se utiliza misturas densas.

Em relação as condições de compactação, observa-se que o melhor comportamento mecânico das matrizes reforçadas com fibras ocorre quando essas matrizes são compactadas no ramo seco (TANG et al., 2016), sendo que a relação entre a resistência a tração na fibra e a quantidade de água usada na compactação segue comportamento semelhante ao da curva de compactação (LI et al., 2018).

Além disso, nota-se uma relação íntima entre a resistência de pico do material com o diâmetro das fibras e a distribuição granulométrica do solo. A adição de fibra de polipropileno em uma camada cimentada de areia manteve a capacidade máxima de carga praticamente inalterada, mas aumentou o deslocamento na carga máxima e melhorou a capacidade de carga final, quando comparada com a camada de areia cimento (CONSOLI et al., 2003).

Consoli et al. (2003) avaliando os resultados de ensaios de prova de carga em compostos de solo-



cimento reforçados com fibras também verificou que o reforço de fibra alterou significativamente o mecanismo de ruptura da camada reforçada, impedindo a formação de trincas de tração quando se comparado com os resultados de ensaios em camadas de solo-cimento sem fibra.

Apesar da bibliografia apresentar os resultados de diversas pesquisas utilizando solo-reforçado com fibras, nota-se que em todas elas, a aplicação direta desses resultados em problemas de campo é prejudicada em função das dimensões dos corpos de prova e do comprimento das fibras utilizadas serem muito pequenos quando comparados com as características geométricas das camadas de base do radier (FESTUGATO et al., 2017).

Como pode ser constatado na vasta literatura sobre o reforço de solos com fibra, o mecanismo de resistência mobilizado é caracterizado pela resistência ao atrito na interface fibra-solo, deste modo, a principal variável é a tensão normal e sua influência é definida em função do rearranjo das partículas do solo, da área de contato na interface, da rugosidade da fibra e da composição do solo (TANG et al., 2010).

Nesse contexto, esse trabalho apresenta os resultados de uma pesquisa sobre o comportamento de matrizes de solo-fibra executadas em campo nas dimensões reais de uso como base de radier submetido a carregamento estático lento por meio de prova de carga em placa.

Utilizou-se modelos de bases constituído de uma camada de 30 cm de espessura executada com solo arenoso fino compactado com grau de compactação de 100 % da energia normal e fibras de polietileno tereftalato (PET). A distribuição de tensões na camada foi avaliada usando o software ELSYM5 calibrado a partir dos resultados da prova de carga.

3. METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida no Campo Experimental de Fundações da UEM, cujo subleito é composto por um solo residual de basalto, evoluído, poroso, classificado com Latossolo Vermelho distroférico e sobre o qual foi executada camada de reforço de 30 cm utilizando solo classificado com Areia Fina pouco Argiloso e fibras de polietileno tereftalato (PET) dispostas aleatoriamente.

3.1. Materiais

O solo utilizado na camada de reforço foi retirado de um horizonte de solo evoluído resultante do intemperismo do arenito Caiuá, cuja jazida está localizada no município de Mandaguáçu, região Noroeste do estado do Paraná. A amostra de solo foi coletada por escavação manual na profundidade de 2,0 m, destorroada, seca ao ar livre e preparada passando na peneira N° 4 (4,8 mm). As amostras da cidade de Mandaguáçu apresentaram limite de liquidez de 29 %, limite de plasticidade de 15 % e índice de plasticidade de 14 %. A massa específica dos sólidos foi de 2,73 g/cm³ e sua distribuição granulométrica formada de 68,0% de areia, 28,0% de argila e 4,0% de silte, sendo esse solo classificado como do grupo A-2-6 e denominado de Areia Argilosa e constituindo de solo arenoso fino.

As Fibras de PET usadas (Figura 2.a) possuíam seção transversal retangular com largura em torno de 1,0 mm e comprimento de 50 mm (medidas utilizadas para o estudo da camada de base).

A inclusão de fibra foi feita de modo aleatório (Figura 2.b), sendo a mistura entre o solo e a fibra de PET, posteriormente compactada nas condições ótimas de compactação da energia normal.

A resistência à tração, o alongamento na ruptura e o módulo de elasticidade da fibra foram determinados de acordo com as recomendações da ASTM D882-18 (2018), medidos em ensaios de tração com velocidade constante de 50 mm/min. As características físicas e mecânicas obtidas nos ensaios de tração são apresentadas na Tabela 1

Figura 2: a) A fibra de PET sendo preparada; b) Fibra de PET misturada ao solo para ensaio de compactação.



A fibra de PET utilizada possui seção transversal aproximadamente retangular e superfície planas com ranhuras que possivelmente está relacionado com o processo de manufatura dos fios e que, no primeiro momento confere uma maior rugosidade a fibra, aumentando a possibilidade de mobilização de atrito e, conseqüentemente, aumentando a ancoragem do reforço no solo.

Tabela 1: Características físicas e mecânicas das fibras de PET.

PARÂMETROS	MÉDIA	DP	CV (%)
Largura média (mm)	1,13	0,27	23,89
Espessura média (mm)	0,63	0,05	7,93
Limite de resistência à tração (MPa)	147,00	0,14	0,09
Alongamento na ruptura (%)	36,98	9,85	26,63
Módulo de elasticidade (GPa)	4,94	0,18	3,64

Nota: DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação.

Fonte: POLASTRI, 2017.

3.2. Métodos

O comportamento das camadas de reforço de solo pode ser analisado usando diferentes métodos para determinação da capacidade de carga e do módulo de reação vertical. Nesse trabalho utilizou a prova de carga estática com carregamento sequencial e incremental sobre a camada de reforço de base executado em campo.

3.2.1. Ensaio de compactação

As quantidades de solo e de fibra de PET foram determinadas em relação ao percentual entre as massas secas dos solos e de fibra. Foram utilizadas camadas de base apenas com solo compactado denominada S(100%) e uma mistura de solo 99% de solo e 1% de fibra denominada S (99%) – F (1%).

Foram usadas fibras com comprimento máximo de 20 mm, dispostas de modo aleatório e misturadas manualmente e compactadas na energia normal obtendo-se $\rho_{\text{máx}}=1,88 \text{ g/cm}^3$ e $\omega t=12,9\%$, para a mistura S(100%) e $\rho_{\text{máx}}=1,82 \text{ g/cm}^3$ e $\omega t=13,4\%$ para a mistura S (99%) – F (1%).

3.2.2. Resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento foi determinada usando ensaios de cisalhamento direto com tensões normais de 50, 100, 200 e 400 kPa. Os ensaios foram realizados segundo o procedimento descrito na ASTM D3080M-11 (2011), usando corpos de prova prismáticos com seção transversal de 60 x 60 mm e 20 mm de altura, compactados nas condições de massa específica aparente seca máxima e teor de umidade ótimo.

Neste ensaio foi utilizada fibras com comprimento máximo de 20 mm, sendo determinadas as rupturas de pico e residuais para deslocamento de 10% do tamanho do corpo de prova. Os valores de coesão (c') e ângulo de atrito (ϕ) obtidos estão mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros de coesão efetiva (c') e ângulo de atrito efetivo (ϕ).

Teores estudados	Tensão pico		Tensão residual	
	c' (kPa)	ϕ	c' (kPa)	ϕ
$S_{(100\%)}$	80,9	26,3°	53,93	25,5
$S_{(100\%)} \text{ inundado}$	43,2	33°	21,9	32,45
$S_{(99\%)} - F_{(1\%)}$	68,2	32,9°	38,55	32,26
$S_{(99\%)} - F_{(1\%)} \text{ inundado}$	27,4	32,5°	25,7	31,43

3.2.3. Programa experimental em campo

Foram realizadas três provas de carga estática com carregamento lento aplicado sobre uma placa circular de 340 mm de diâmetro, sendo a primeira sobre uma camada de solo compactado sem adição de fibra, a segunda sobre a camada de solo compactada com adição de 1% fibra em substituição da massa de solo seco, e a terceira realizada no solo natural.

As bases foram executadas nas dimensões de 0,3 m de espessura, 1 m de largura e 1 m de comprimento. A preparação das misturas foi feita com auxílio de uma betoneira de 150 litros e a compactação realizada em 3 camadas de 10 cm com controle de compactação medindo-se a massa de materiais lançados e o volume de material no final da compactação de cada camada de modo a obter os valores de peso específico seco e umidade ótima das misturas para energia de compactação normal.

As provas de carga foram executadas de acordo com ASTM D1196M-16 (2016) com aplicação de carregamento estático em placa posicionada na superfície superior da base. A Figura 3 mostra um esquema do sistema de reação e do corpo de prova ensaiado destacando-se os seguintes componentes: macaco hidráulico; célula de carga elétrica com leitora analógico-digital, devidamente aferida; relógios comparadores com resolução de centésimo de milímetro e vigas de referência.

Para as medidas de recalque foram conectados sobre a placa de ensaio dois relógios dispostos diametralmente e fixados na viga de referência (Figura 4).

Figura 3: Estrutura do ensaio de placa.

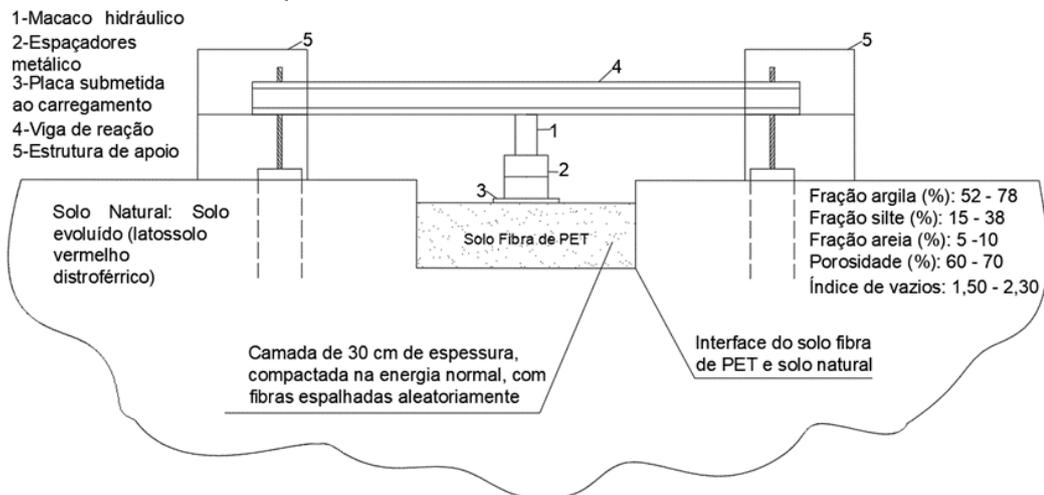


Figura 4: a) Vista frontal da camada de base sendo ensaiada; b) Vista frontal do subleito sendo ensaiado.

a)



b)



3.2.3. Modelagem numérica

O cálculo da distribuição de tensão na camada de base foi feito a partir de uma modelagem numérica usando o programa computacional ELSYM5.

O ELSYM5 é um programa computacional de análise elástica linear no qual a fundação é considerada com um sistema de múltiplas camadas onde cada uma delas possui comportamento homogêneo e isotrópico, possibilitando a simulação da interação entre a camada de base e do solo natural.

O carregamento na placa circular foi simulado usando um modelo axissimétrico com eixo de simetria passando pelo centro da placa. A não linearidade física e geométrica do problema foi resolvida efetuando-se várias simulações lineares equivalentes a cada nível de tensão até que ocorresse a convergência de deslocamentos. A interface entre as camadas foi admitida como aderência perfeita entre duas camadas consecutivas (base e solo natural), sendo esse mesmo comportamento aplicado para a placa rígida que simula o radier e sobre a qual se aplicou uma carga uniformemente distribuída em sua área. O modelo foi calibrado usando os resultados de curva carga-recarga obtidos nas provas de carga e os parâmetros de deformabilidade do solo natural e da camada de reforço obtidos a partir dos valores do coeficiente de reação vertical também determinados nas curvas carga-recalque (Tabela

3).

Tabela 3: Valores do E calculado pela teoria da elasticidade.

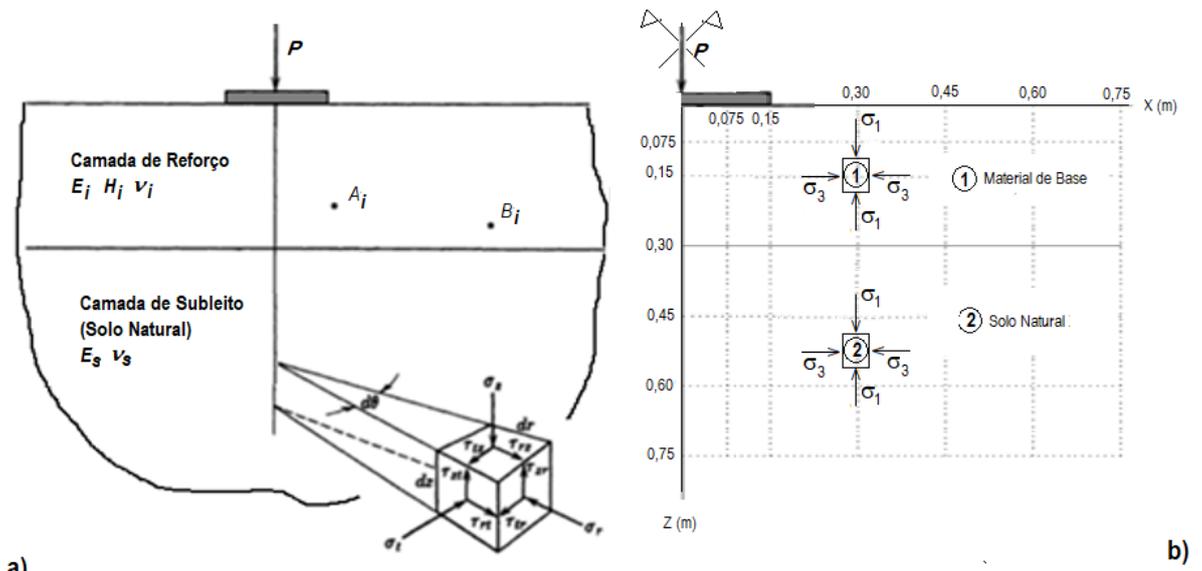
σ_{Ensaio} (MPa)	$W_{S_{(100\%)}}$ Ensaio (mm)	$W_{S_{(99\%)-F(1\%)}}$ Ensaio (mm)	$E_{S_{(100\%)}}$ Calculado (MPa)	$E_{S_{(99\%)-F(1\%)}}$ Calculado (MPa)	$E_{S_{(100\%)}}$ ELSYM 5 (MPa)	$E_{S_{(99\%)-F(1\%)}}$ ELSYM5 (MPa)
0,28	0,88	1,33	35,07	53,01		
0,55	2,97	4,57	20,05	30,85	48	69
1,1	37,74	42,5	4,31	4,86		

A Figura 5 apresenta os pontos onde as tensões foram calculadas na simulação numérica da prova de carga (Figura 5a). Foram traçadas curvas de isovalores para a tensões normais na direção vertical e horizontal, além das tensões de cisalhamento.

Observa-se na Figura 5b que a interface de transição da camada de base para o solo natural ocorre na profundidade de 0,3 m (valor igual ao diâmetro da placa). Foram analisadas as tensões para os carregamentos 25 kN (carga de serviço), 50 kN (carga de descarregamento realizada em campo) e carga de ruptura obtido em campo.

O estágio de carregamento de 25 kN (carga de referência ou de serviço) foi adotado em função de que deslocamento correspondente a este nível de carga obtido nos ensaios de provas de carga foram da ordem de 1,27 mm, sendo portando, o valor de referência para cálculo do coeficiente de reação vertical e, conseqüentemente, para dimensionamento da armadura do radier. A carga de 50 kN foi escolhida em função da segurança em relação a capacidade de suporte do solo, considerada, em projetos de fundações como 2 vezes o valor da carga de serviço.

Tabela 5: Representação esquemática do modelo geométrico de cálculo das tensões no reforço.



4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise das provas de carga

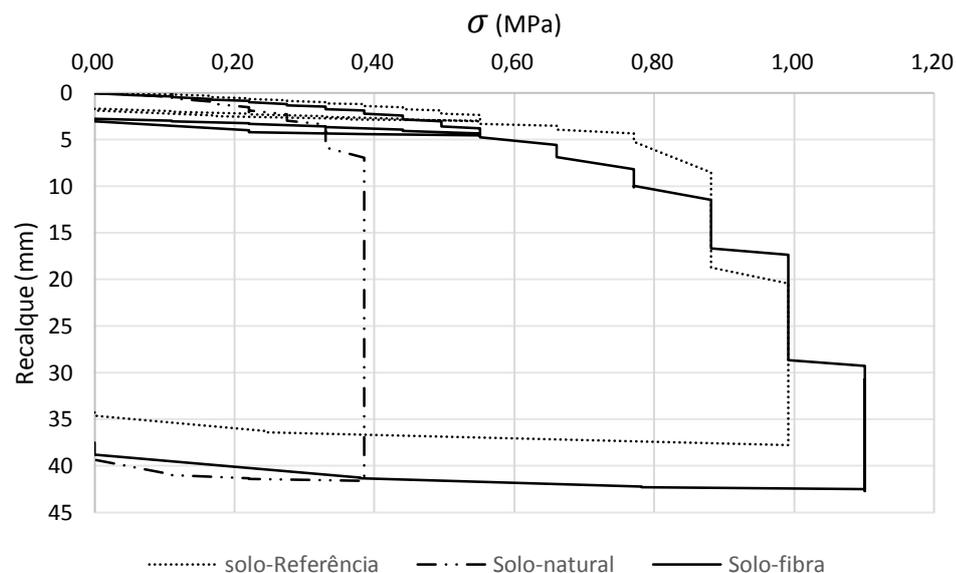
A Figura 6 mostra as curvas carga-recalque para os modelos ensaiados com carregamento estático em placa circular realizado no subleito, na camada de base sem reforço e na camada de base reforçada com fibra.

Como pode ser observado na curva carga-recalque para o solo natural, a ruptura ocorreu para uma pressão de 0,38 MPa e um deslocamento correspondente de 6 mm (2% do diâmetro da placa) caracterizando uma ruptura do tipo física. No descarregamento, observa-se que o deslocamento recuperável foi da ordem de 2 mm demonstrando também que praticamente todos os deslocamentos medidos após a ruptura eram deslocamentos permanentes.

O resultado da prova de carga executada na base de solo compactado, S(100%), apresentou pressão de ruptura de 0,99 MPa com um deslocamento correspondente a 20 mm (6,6% do diâmetro da placa). Neste ensaio foi realizado dois ciclos de carga e descarga, para verificação do comportamento da base quando submetido a pressões no início do processo de ruptura. O primeiro ciclo de carga foi conduzido até atingir a pressão na placa de 0,55 MPa com recalque correspondente a 2,97 mm. Após o descarregamento verifico se que a parcela do deslocamento recuperável foi da ordem de 1,3 mm, e conseqüentemente o deslocamento permanente foi de 1,67 mm, caracterizando assim um estado de início da plastificação do solo. O segundo ciclo foi realizado até se a atingir a ruptura completa com deslocamento da ordem de 34 mm ou 10% do diâmetro da placa, sendo observado que no descarregamento o deslocamento recuperável foi de 3,2 mm.

A base de solo reforçado com fibra, S(99%)-F(1%), atingiu a capacidade de carga de 1,10 MPa ,ou seja, aproximadamente 10% de ganho de resistência em relação ao S(100%) com um deslocamento correspondente de 29 mm (9,6% do diâmetro da placa).

Figura 6: Curva pressão (σ) versus Recalque.



Durante a realização dos ensaios, constatou-se o surgimento de trincas concêntricas em relação a placa características de ruptura por puncionamento. Pode-se verificar que ao se aproximar da carga de

ruptura, os modelos atingiram grandes deslocamentos verticais (da ordem de 10% do diâmetro da placa) acompanhados de trincas e fissuras ao longo do perímetro da placa (Figura 7).

Após o ensaio, fez-se um corte transversal na camada de S(100%) a fim de avaliar o mecanismo de ruptura (Figura 8a). Um fato constatado foi o surgimento de fissuras que se iniciou na superfície da camada de apoio da placa e se estenderam até a interface solo (base - solo natural) no qual as fissuras apresentaram inclinação superior a 90°, formando um tronco de cone, compatível com o conceito de ruptura por cisalhamento local (Figura 8b).

Figura 7: Forma de ruptura na superfície da camada: (a) vista frontal da placa penetrada no solo; (b) vista frontal da superfície rompida.

a)



b)

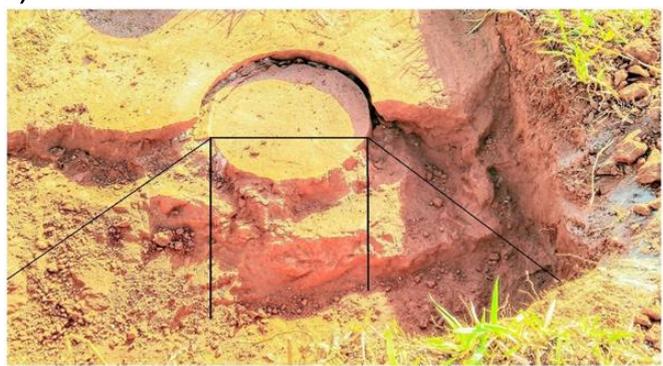


Figura 8: a) Região de cisalhamento imediatamente abaixo da área carregada b) Vista frontal do corte transversal da base ensaiada.

a)



b)



A equação de capacidade de carga de Terzaghi foi adotada para interpretação dos resultados dos ensaios de placa para as camadas S(100%) e S(99%)-F(1%). O cálculo da capacidade de carga das camadas foi feito usando os valores de coesão e ângulo de atrito mostrados na Tabela 2 e seus valores são apresentados na Tabela 4 em comparação com os obtidos na prova de carga. Os resultados analíticos expressos na Tabela 4 mostram que o cálculo da capacidade de carga sem considerar parâmetros de redução, superestima a carga de ruptura para as camadas S(100%) e S(99%)-F(1%), com valores de razão entre carga prevista e carga medida de 2,82 e 4,81,

respectivamente. Observa-se que o uso de parâmetros de redução resultou na aproximação da carga de ruptura medida em campo, ao passo que consideramos o modelo de ruptura adequado para o cálculo da capacidade de carga.

Tabela 4: Valores de capacidade de carga ensaiado e calculado.

Camada	Capacidade de carga medida (kPa)	Capacidade de carga calculada (kPa) (Parâmetros não reduzidos)	Capacidade de carga calculada (Parâmetros reduzidos) (kPa)
$S_{(100\%)}$	999	2823,62	967,7
$S_{(99\%)}-F_{(1\%)}$	1100	4440,65	1066,28

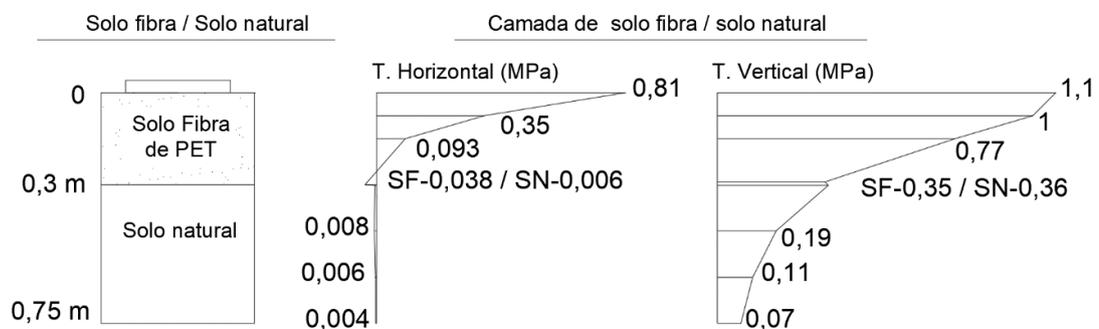
4.2. Modelagem numérica

Os valores de tensão em σ_x , σ_z e τ_{xz} para a camada de $S(100\%)$ e $S(99\%)-F(1\%)$ foram calculados com base nos valores de E apresentados na Tabela 3.

A avaliação da capacidade suporte do solo realizada com a comparação entre as tensões atuantes correspondentes aos carregamentos aplicados calculados pelo programa ELSYM5 para os casos de base de solo compactado e base de solo compactado reforçado com fibra e a resistência ao cisalhamento obtida pela envoltória transformada no diagrama (p-q) definida com os parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) determinados em laboratório com o ensaio de cisalhamento direto comprovam que a camada de $S(99\%)-F(1\%)$ sofre ruptura por cisalhamento com visto na forma da superfície de ruptura (Figura 8b).

Nota-se que na interface do reforço de solo-fibra com o solo natural, as tensões normais horizontais foram negativas, indicando que a camada de reforço solo-fibra mobilizou o mecanismo de transferência de esforços. Nota-se, também, que a camada de solo reforçado com fibra mobiliza um efeito de viga nesta camada (tração na parte inferior e compressão parte superior), sendo que as fibras de PET mobilizaram a resistência tração na interface com o subleito (Figura 9).

Figura 9: Tensões verticais e horizontais para o carregamento de 100 kN na interface entre as camadas (SF-MPa / SN-MPa).

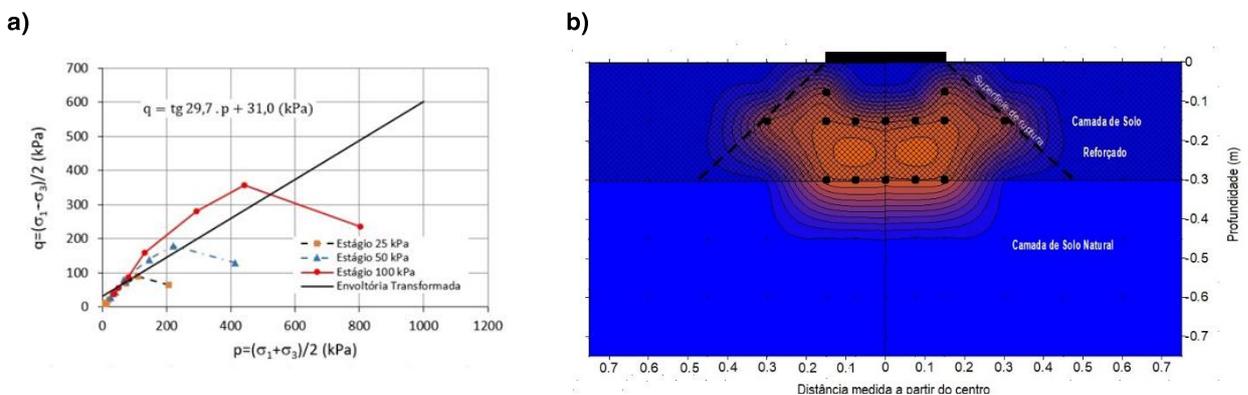


A análise do diagrama de tensões normais verticais calculadas demonstra que a inserção da camada de solo reforçado com fibra não altera a distribuição de tensões verticais, isso ocorre, possivelmente devido ao fato de que a camada de solo reforçado com fibra possui sua rigidez semelhante a rigidez da camada de solo.

A capacidade de suporte da base do radier está intimamente ligada às tensões de plastificação (ruptura do solo) que foram identificadas usando a envoltória de resiliência transformada (Figura 10).

Pode-se notar que os pares de tensão que caracterizou a ruptura ou plastificação da camada de reforço por cisalhamento correspondem ao nível de carregamento que ocorreram para as cargas de 50 kN e 100 kN, demonstrando que o processo de ruptura se inicia a partir da carga de 50 kN e prossegue até a ruptura completa por cisalhamento da base. Os pares de tensão que correspondem ao nível de carregamento de 25 kN não apresentaram plastificação do solo, o que colabora com os resultados dos experimentais que demonstraram que para esse nível de carregamento os deslocamentos e deformações foram recuperáveis (comportamento resiliente). Nota-se, também, que os pontos que apresentaram plastificação nas tensões correspondentes a carga 100 kN ficaram restritos a região delimitada por uma distância de 0,30 m do centro da placa e 0,30 m de profundidade, ou equivalente a uma vez o seu diâmetro.

Figura 10: Envoltória transformada e os pontos da região onde ocorreu a plastificação (ruptura do solo).



As curvas de isovalores de tensões são mostradas na Figura 11 para a base S(100%) e Figura 12 para a base S(99%)-F(1%), onde se observa que a tensão cisalhante máxima para o modelo S(99%)-F(1%) ocorre na região superior da camada de reforço solo-fibra (interface placa-solo), indicando a ocorrência da ruptura local (Figura 11). A Figura 12 destaca que os valores máximos das tensões cisalhantes se concentram na região até a profundidade de 0,3 m (transição entre a camada de reforço e o solo natural).

Figura 11: Distribuição de tensões no solo.

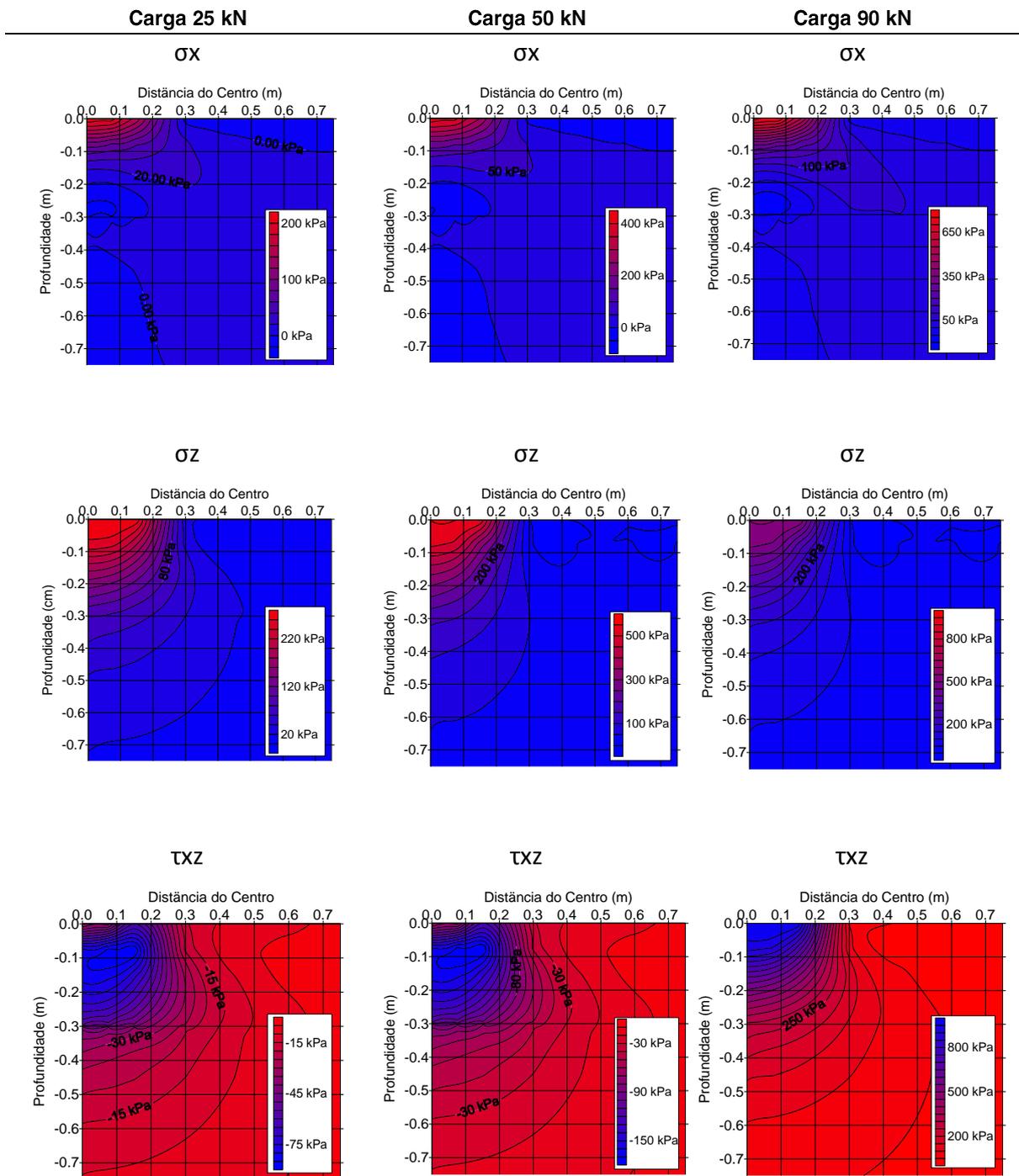
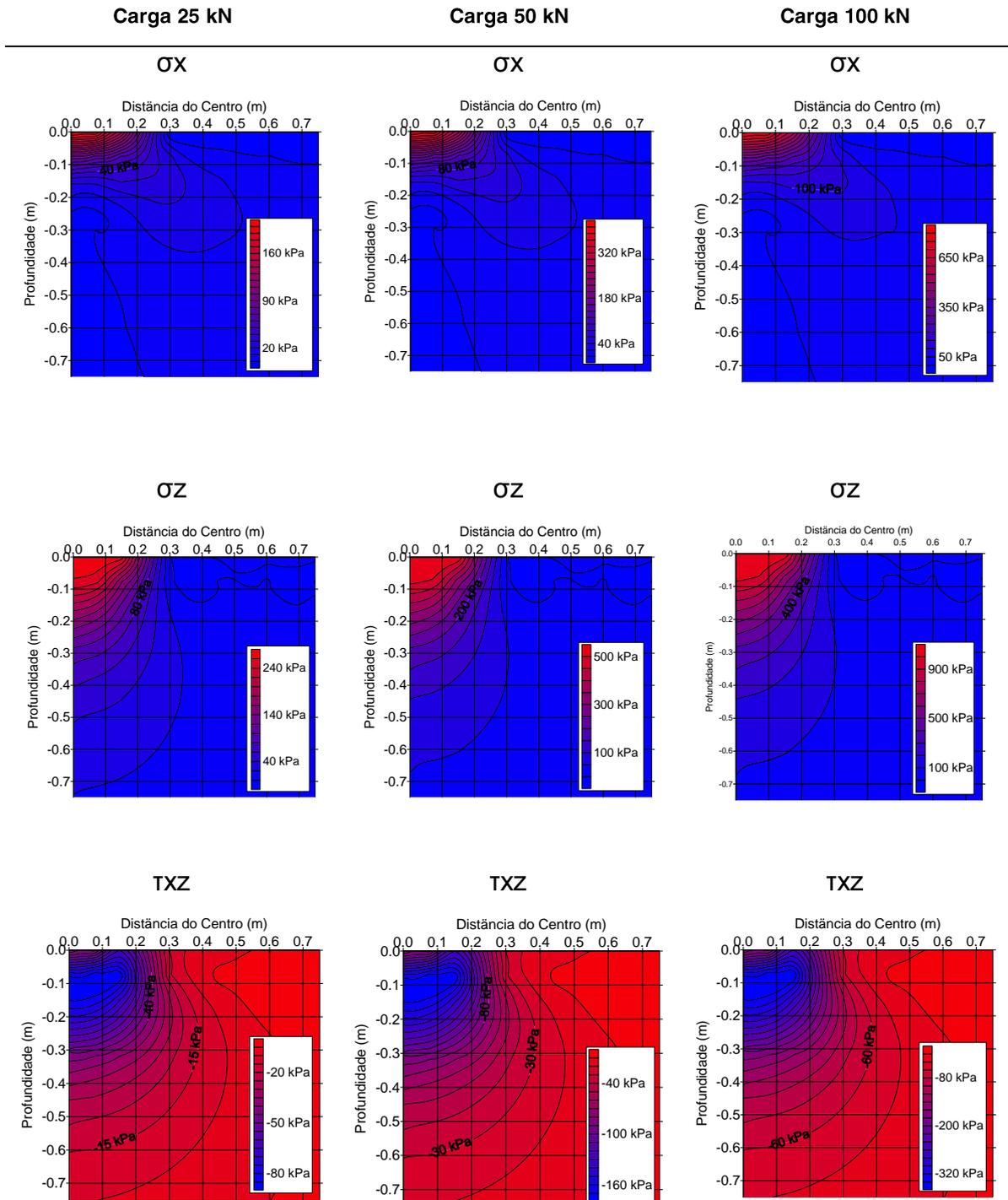


Figura 12: Distribuição de tensões solo-fibra de PET.



5. Conclusão

O solo usado como camada de base neste trabalho é classificado como areia argilosa conforme o Sistema Unificado de Classificação de Solos e solo do tipo A-2-6, de acordo com a AASHTO/HRB.



Por meio do ensaio de resistência ao cisalhamento direto concluiu-se que a composição de S(100%) obteve maior valor de coesão, tanto para condição natural como inundada, quando comparado com a composição S(99%)-F(1%), além de constatar que o ângulo de atrito para as duas composições manteve-se próximo. O comportamento observado nos ensaios das composições mostrou um aumento da tensão de pico e tendência de redução da queda da tensão pós-pico em relação ao solo no estado natural. Pode-se assim concluir que a inclusão de 1% de fibra de PET no solo implica no aumento da tensão pós-pico aliado com a redução da queda de tensão após a ruptura do solo.

A análise dos resultados de prova de carga mostrou que a adição de 1% de fibra de PET ao solo da camada de reforço promoveu um aumento da capacidade de carga em relação a camada de solo compactado sem fibra. Apesar disso, nota-se que a mobilização de resistência do conjunto solo fibra necessita de maiores deslocamentos. Pode ser observado devido aos deslocamentos medidos na ruptura da mistura solo fibra serem superiores aos deslocamentos obtidos na ruptura na camada de S(100%) compactada. Também ocorreu para no nível de aplicação de carga de serviço.

Em relação forma da superfície de ruptura, observa-se a formação de um cone de ruptura caracterizando assim a ruptura por cisalhamento local. Nota-se que no modelo com solo reforçado com fibra ocorreu o arrancamento da fibra, demonstrando a ancoragem da fibra ao solo.

Os cálculos das tensões pelo programa ELSYM5 mostrou que a região de cisalhamento corresponde a região de formação do tronco de cone e também colabora para o fato da ruptura em campo ter ocorrido com grandes deslocamentos.

Dessa forma, conclui-se que a adição de 1% de fibra ao solo promove um aumento na capacidade de carga tal como verificado em outras pesquisas. Os resultados demonstram, também, que esse ganho de capacidade de suporte ocorre em função da mobilização da resistência a tração da fibra (efeito de viga).

6. REFERÊNCIAS

Anggraini, V., Asadi, A., Syamsir, A., & Huat, B. B. (2017). Three point bending flexural strength of cement treated tropical marine soil reinforced by lime treated natural fiber. *Measurement*, 111, 158-166.

Amin Soltani, A., Deng, A., Taheri, A., "Swell-compression characteristics of a fiber reinforced expansive soil". *Geotextiles and Geomembranes*, v. , n. , pp. 183-189, Jan. 2018.

American Society For Testing And Materials. D1196M-12: standard test method for nonrepetitive static plate load tests of soils and flexible pavement components, for use in evaluation and design of airport and highway pavements, United States, ASTM, 2016.

American Society For Testing And Materials. D3080M-11: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM, 2011.

American Society For Testing And Materials. D882-18: Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting, United States, ASTM, 2018.

Budhu, M. *Fundações e estruturas de contenção*. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 20.

By M. H. Maher, M.H., Ho, Y. C., 1994. Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(8): 1381-1393.



- Correia, A.S.A., Oliveira, P.J.V., Custodio, D.G., 2015. "Effect of polypropylene fibres on the compressive and tensile strength of a soft soil artificially stabilised with binders". *Geotext. Geomembranes*, Volume 43, April 2015, pp 97-106.
- Casagrande, M.D.T., Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações, Tese de D. Sc., PPEC/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2005.
- Consoli, N.C., Montardo, J.P., Donato, M., Prietto, P.D.M., "Effect of material properties on the behaviour of sand–cement–fibre composites", *Ground Improvement*, v.8, n. 2, p.77–90, 2004.
- Chen, M., Shen, S.L., Arulrajah, A., Wu, H.N., Hou, D.W., Xu, Y.S., 2015. Laboratory evaluation on the effectiveness of polypropylene fibers on the strength of fiber-reinforced and cement-stabilized shanghai soft clay. *Geotextiles and geomembranes* 43:515-523.
- Consoli, N.C., Vendruscolo, A. M., Prietto, P.D.M., 2003. Behavior of Plate Load Tests on Soil Layers Improved with Cement and Fiber. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 129(1):96-101.
- Consoli, N.C., Schnaid, F., Milititsky, J., 1998. INTERPRETATION OF PLATE LOAD TESTS ON RESIDUAL SOIL SITE. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(9): 857-867
- Estabragh, A.R., Rafatjo, H., Javadi, A.A., 2014. "Treatment of an expansive soil by mechanical and chemical techniques". *Geosynth*. Volume 21 Issue 3, June 2014, pp. 233-243.
- Festugato, L., Menger, E., Benezra, F., Kipper, E.A., Consoli, N.C., 2017. "Fibre-reinforced cemented soils compressive and tensile strength assessment as a function of filament length". *Geotext. Geomembranes*, Volume 45, February 2017, pp 77-82.
- Gray, D.; Ohashi, H., "Mechanics of fiber reinforced in sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, New York, v.109, n.3, p.335-353, 1983.
- Jha, A.K., Sivapullaiah, P.V., "Gypsum–induced volume change behavior of stabilized expansive soil with fly ash–lime". *Geotech*. Volume 39, May 2016, pp. 391–406.
- Kumar, A., Gupta, D., "Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced pond ash, rice husk ash–soil mixtures". *Geotext. Geomembranes*, Volume 44, Issue 3, June 2016, pp 466-474.
- Li, Y., Ling, X., Su, L., An, L., Li, P., Zhao, Y., 2018. Tensile strength of fiber reinforced soil under freeze-thaw condition. *Cold regions science and technology* 146: 53-59.
- Medina, J.; Motta, L. M. G., "Mecânica dos pavimentos", 3 ed.. Rio de Janeiro, Interciência, 2005.
- Neto, P.S.L., Gonçalves, H.B.B., Oliveira, F.H.L., Aguiar, M.F.P., "Estudo de utilização de fibras de polipropileno como reforço em solo para a pavimentação rodoviária", In: 45ª RAPV – Reunião anual de Pavimentação 19º ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, 1º Fórum rodoviário de trânsito e de mobilidade, pp. 20-23, Brasília, DF, Set. 2016.
- Polastri, P., Incorporação de resíduos de polietileno tereftalato (PET) como reforço em compósitos solo-cimento, Dissertação de M.Sc., DEC-PEU/UEM, Maringá, PR, Brasil, 2017.
- Sharma, V., Kumar, A., 2017. Influence of relative density of soil on performance of fiber-reinforced soil foundations. *Geotextiles and Geomembranes* 45: 499 e 507
- Tang, C.S., Shi, B., Zhao, L.Z., 2010. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. *Geotextiles and*



geomembranes 28: 54-62.

Tang, C.S., Li, J., Wang, D., Shi, B., 2016. Investigation on the interfacial mechanical behavior of wave-shaped fiber reinforced soil by pullout test. *Geotextiles and geomembranes* 44: 872-883.

Vendruscolo, M.A., Comportamento de ensaios de placa em camadas de solo melhoradas com cimento e fibras de polipropileno, Tese de D. Sc., PPEC/ UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2003.

Jamsawanga, P., Suansomjeenb, T., Sukontasukkulc, P., Jongpradistd, P., BergadoE, D. T. "Comparative flexural performance of compacted cement-fiber-sand". *Geotextiles and Geomembranes*, v. , n., pp 414–425, Mar. 2018.

Jiang, H., Cai, Y., Liu, Jin., 2010 .Engineering Properties of Soils Reinforced by Short Discrete Polypropylene Fiber. *JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING* 22(12): 1315-1322.

João Henrique de Freitas

Engenheiro civil/ Mestre. Professor temporário em estrutura/ Universidade Estadual De Maringá (UEM) – CTC – DTC /Universidade Estadual de Maringá (UEM).

Contribuição de coautoria: Autor do artigo, com desenvolvimento em: fundamentação teórico-conceitual e problematização; pesquisa de dados e análise; elaboração de figuras e tabelas; Fotos; elaboração e redação do texto; seleção das referências bibliográficas; revisão do texto.

Paula Polastri

Engenheira Ambiental / Mestra em Engenharia Urbana e Doutoranda em Engenharia Química. Pós-graduação em Engenharia Química (PEQ) / Departamento de Engenharia Química (DEQ) / Universidade Estadual de Maringá (UEM)

Contribuição de coautoria: Realização das análises de caracterização da fibra de PET utilizada como material na presente pesquisa.

Generoso De Angelis Neto

Graduação em Engenharia Civil. Mestrado em Geotecnia/ Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana. Professor Titular em Construção Civil - Gestão de Resíduos da Construção Civil/ Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá (DEC)/ Universidade Estadual de Maringá (UEM).

Contribuição de coautoria: Realização das análises e interpretação da caracterização da fibra de PET utilizada como material na presente pesquisa.

Antonio Belincanta

Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Paraná (1973), graduação em Administração de Empresas pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (1973), mestrado em Engenharia de Solos pela Universidade de São Paulo (1985) e doutorado em Engenharia Civil Geotecnia S Carlos pela Universidade de São Paulo (1998). Professor associado da Universidade Estadual de Maringá/ Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá (DEC)/ Universidade Estadual de Maringá (UEM).



Contribuição de coautoria : Professor coorientador, auxílio na elaboração da pesquisa: fundamentação teórico; execução dos ensaios.

Jeselay Hemetério Cordeiro dos Reis

Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (1997), mestrado em Geotecnia pela Universidade de São Paulo (2000) e doutorado em Geotecnia pela Universidade de São Paulo (2006). Professor adjunto da Universidade Estadual de Maringá/ Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá (DEC)/ Universidade Estadual de Maringá (UEM).

Contribuição de coautoria: Professor orientador, auxílio na elaboração da pesquisa: fundamentação teórico; pesquisa de dados e análise; elaboração de figuras e tabelas; Fotos; execução dos ensaios; revisão do texto.

Agência(s) de fomento da pesquisa: O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

Como citar: FREITAS, João Henrique de, et. al.. Avaliação do Comportamento em Campo de Solo Reforçado com Fibras de Pet para Bases de Radier. *Revista Paranoá*. n. 29, jan/jun 2021. DOI [10.18830/issn.1679-0944.n29.2021.03](https://doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n29.2021.03)

Editor responsável: Daniel Richard Sant’Ana