

Estudo Comparativo de Três Geossintéticos no Reforço de Base de Pavimentos com Ensaios de Arrancamento de Pequenas Dimensões

Julio A. Zambrano Ferreira e Benedito S. Bueno

Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil

Jorge G. Zornberg

Civil Engineering Department, University of Texas at Austin, Austin, Estados Unidos

RESUMO: Este trabalho apresenta um estudo comparativo da eficiência de diferentes geossintéticos no reforço de base de pavimentos de obras viárias com ensaios de arrancamento de pequeno porte. Utilizou-se geogrelhas de polipropileno e de fibra de vidro e geotêxtil tecido de polipropileno. Foram empregados um solo com 58% de argila (subleito) e um pedregulho areno-siltoso (camada de base). Os ensaios de arrancamento foram executados com diferentes combinações entre solos e geossintéticos, utilizando um novo sistema de sensores óticos a laser para medida direta de deslocamentos ao longo do reforço. Os resultados mostram que a geogrelha de polipropileno é a melhor opção para os solos e geossintéticos estudados, seguida do geotêxtil tecido de polipropileno e da geogrelha de fibra de vidro.

PALAVRAS-CHAVE: Reforço de Pavimentos, Ensaios de Arrancamento, Geogrelha de Fibra de Vidro, Geogrelha de Polipropileno.

1 INTRODUÇÃO

O desempenho de obras viárias pode ser melhorado com o uso de geossintéticos para reforçar a camada de base e a capa asfáltica de pavimentos flexíveis. No reforço de base, a inclusão pode ser posicionada tanto à meia altura da camada, quanto na interface desta com o subleito. Espera-se que o reforço provoque um aumento da resistência do pavimento e maior distribuição de cargas, independentemente da posição da inclusão. Para o reforço ser solicitado neste tipo de aplicação, é necessário que ele esteja intimamente solidário ao solo adjacente, pois pequenos deslocamentos já podem inviabilizar a utilização do pavimento. Esta condição torna-se mais eficiente quanto maior for a rigidez da inclusão.

Ensaios de arrancamento em laboratório são uma interessante forma de avaliar a eficiência de geossintéticos no reforço de base de rodovias é através de. Estes ensaios permitem o estudo da interação solo-reforço e a obtenção de

parâmetros de projeto, além de serem expeditos e de baixo custo de execução. Tradicionalmente, ensaios de arrancamento empregam equipamentos de grandes dimensões (ASTM D6706) que utilizam cerca de 0,5 m³ de solo por ensaio. O uso de equipamento de pequenas dimensões torna-se uma alternativa ainda mais prática e barata, diminuindo tempo de execução, materiais e equipamentos.

Assim, no presente trabalho foi realizado um estudo comparativo com ensaios de arrancamento em equipamento de pequenas dimensões, para determinar o material de melhor desempenho no reforço de base de pavimentos de obras viárias.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A caixa de arrancamento utilizada no programa experimental possui dimensões internas de 250 mm de comprimento, 300 mm de largura e 150 mm de altura (Fig. 1). É necessário um volume de solo de apenas 0,01125 m³ (2% do volume

empregado em equipamento de grandes dimensões). A aplicação da sobrecarga é realizada com ar comprimido injetado numa bolsa inflável de PVC acoplada à tampa da caixa.

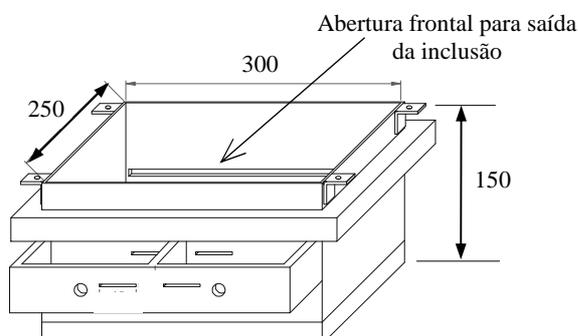


Figura 1. Perspectiva da caixa de pequenas dimensões para ensaios de arrancamento. Nota: Dimensões em mm.

Os deslocamentos do corpo-de-prova foram obtidos através de um sistema composto por fios de aço inoxidável de 0,35 mm de diâmetro e dois pesos, de 200 g de massa, os quais servem de mira para um medidor de deslocamentos a laser. No decorrer dos ensaios, os sensores acompanham a movimentação da mira previamente determinada e fornecem deslocamentos com resolução de centésimos de milímetros. Na Figura 2 é apresentado o medidor de deslocamentos a laser.

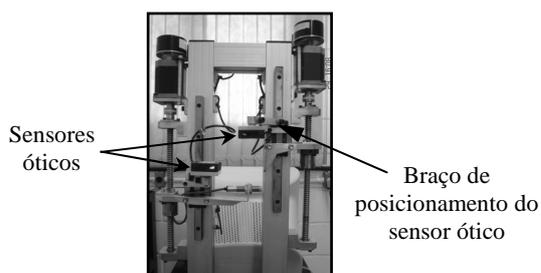


Figura 2. Medidor de deslocamentos a laser.

Para aplicação e registro da força de arrancamento, foi utilizada uma garra pneumática conectada a célula de carga de duas toneladas de capacidade máxima, que por sua vez, conecta-se à máquina universal de 100 kN de capacidade da Emic modelo DL – 10000. As informações de força e deslocamento são registradas diretamente em computador.

Dois tipos de solos foram utilizados nesta pesquisa. A Figura 3 exibe as curvas granulométricas e a Tabela 1 a caracterização dos mesmos. O solo 1, nomeado como base, é um pedregulho areno-siltoso oriundo de Navasota no Texas – EUA e é utilizado como camada de base de pavimentos. O solo 2 é um solo argiloso, nomeado como subleito e é proveniente do município de Austin no Texas-EUA, onde é conhecido como “fire clay”. O uso destes materiais faz parte de uma parceria de pesquisa entre a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo e a Universidade do Texas em Austin.

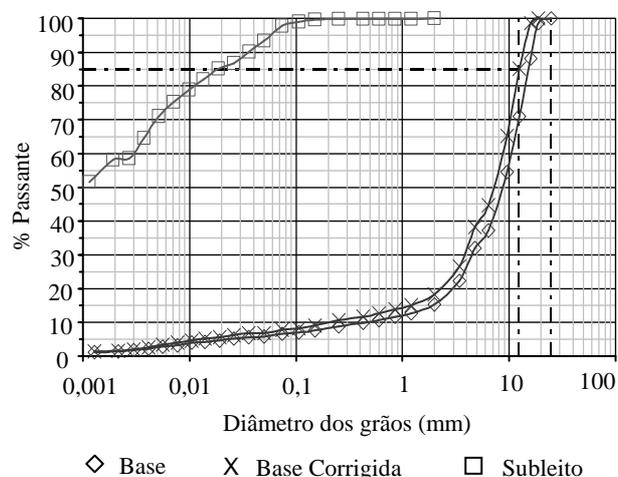


Figura 3. Curvas granulométricas dos solos utilizados.

Tabela 1. Propriedades dos solos utilizados na pesquisa.

Propriedades	Solos ^(a)	
	1	2
Nome	Base	Subleito
ρ_s (g/cm ³)	2,70	2,70
w_L (%)	—	59
w_P (%)	—	23
IP (%)	—	36
$\rho_{d,max}$ (g/cm ³) ^(b)	2,27 ^(c)	1,73
w_{ot} (%) ^(b)	7 ^(c)	19
ϕ' (°)	45 ^(d)	17
c (kPa)	—	0
GC (%)	100	100
Classificação (SUCS)	GM	CH

Nota: (a) Valores fornecidos por Gupta (2006). (b) Ensaio de Proctor com Energia Normal. (c) Ensaio de Proctor realizado segundo Método C da ASTM D 698-00a. (d) Estimativa segundo Lambe e Whitman (1979).

Buscando minimizar interferências nas condições de contorno dos ensaios de

arrancamento, foi realizada a correção granulométrica do solo da camada de base segundo os critérios da ASTM D6706. Para a caixa de arrancamento utilizada, os valores de "D₈₅" e "D_{max}" calculados para que o solo atenda estas relações estão ilustrados graficamente na Figura 3 com linhas pontilhadas. Em todos os ensaios, o solo de base refere-se ao solo com a curva granulométrica modificada.

Na compactação do solo no interior da caixa de testes, utilizou-se compactador pneumático Bosch, modelo GSH 11E, com o acoplamento de uma sapata quadrada de 15 cm de largura em sua haste. Os materiais foram compactados na umidade ótima e com grau de compactação de 100% na energia normal de Proctor.

Em relação aos materiais de reforço, foram utilizados na pesquisa três diferentes geossintéticos e suas características estão na Tabela 2.

Tabela 2. Características dos geossintéticos utilizados na pesquisa.

Propriedade	Tipo de geossintético e material de fabricação Sentido de fabricação	GG	GT	GG
		PP	PP	FV
Resistência à tração (kN/m)	L	12,4	70	50
	T	19,0		50
Abertura da malha (mm)	L	25,0		22,5
	T	38,0		30,0
Espessura do elemento (mm)	T	0,80		1,50

Nota: Valores nominais de resistência à tração.

GG – Geogrelha; GT – Geotêxtil tecido; PP – Polipropileno; FV – Fibra de vidro; L – Longitudinal; T – transversal.

2.1 Procedimento de Ensaio

Inicialmente, fios de aço inoxidável eram fixados em junções das geogrelhas ou elementos do geotêxtil tecido à distâncias de 90 mm e 165 mm em relação à parede frontal da caixa de arrancamento.

Com a finalidade de diminuir o atrito de interface solo-caixa, as paredes internas da caixa de arrancamento foram revestidas com duas camadas de plástico fino e rígido intercaladas com graxa. Em seguida, os solos eram compactados na umidade ótima com 100

% de grau de compactação na energia normal. Tanto a camada inferior quanto a superior foram compactadas em duas etapas. Nos ensaios realizados com pedregulho, posicionava-se um geotêxtil não-tecido de baixa gramatura para proteção da bolsa inflável de PVC da tampa da caixa de testes.

Logo depois, a caixa de arrancamento era posicionada na máquina universal, os geossintéticos presos à garra e os sensores óticos de leitura de deslocamentos ajustados. A pressão de ar comprimido era aplicada no topo da amostra via bolsa de PVC. Realizava-se então o ensaio de arrancamento à velocidade de 3 mm/min. A Figura 4 apresenta o layout do ensaio.

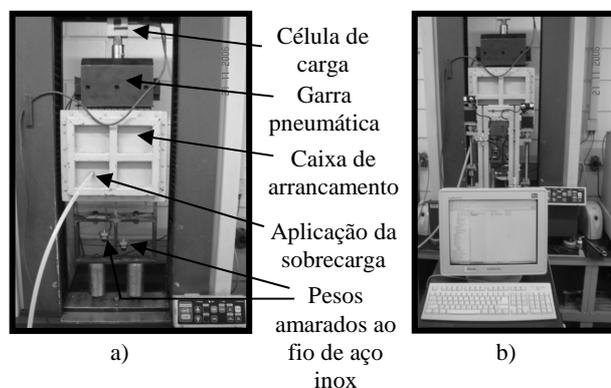


Figura 4. Layout do ensaio de arrancamento de pequenas dimensões. a) Posicionamento da caixa de testes. b) Posicionamento do transdutor de deslocamentos a laser.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios foram realizados variando-se o tipo de geossintético. Utilizou-se duas sobrecargas, 7 e 21 kPa, buscando compatibilidade com as tensões normais ocorridas em pavimentos rodoviários. A Tabela 3 mostra as configurações dos ensaios.

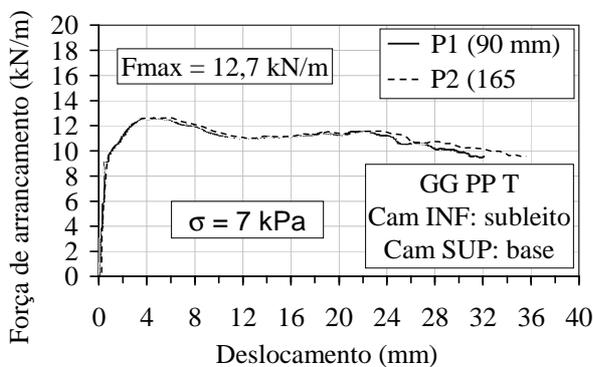
As curvas obtidas em todos os ensaios apresentam comportamento similar aos descritos na literatura. Ou seja, o ponto de medida de deslocamentos mais próximo à aplicação da força de arrancamento é mobilizado antes do ponto mais distante.

Tabela 3. Configurações do ensaios de arrancamento.

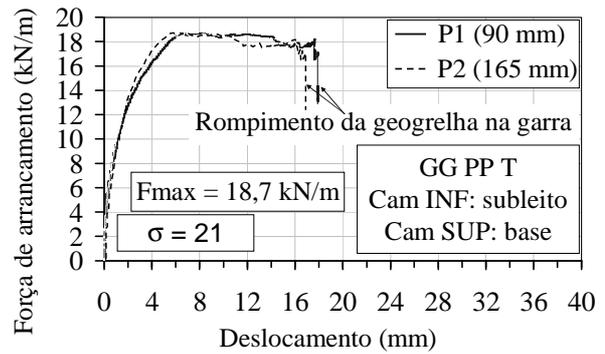
Ensaio N°	Camada INF	Geossint / Direção Fabricação	Camada SUP	Tensão Normal (kPa)
3	Subleito	GG PP / T	Base	7
4	Subleito	GG PP / T	Base	21
5	Subleito	GT PP / L	Base	7
6	Subleito	GT PP / L	Base	21
7	Subleito	GG FV / L	Base	7
8	Subleito	GG FV / L	Base	21

Nota: INF – Inferior; Geossint – Geossintético; SUP – Superior; GG – Geogrelha; GT – Geotêxtil tecido; PP – Polipropileno; FV – Fibra de vidro; T – Transversal; L – Longitudinal.

Os resultados dos ensaios 3 e 4 estão apresentados na Figura 5. A Figura 6 exibe os resultados dos ensaios 5 e 6 e a Figura 7 dos ensaios 7 e 8. A única diferença entre estes ensaios é o geossintético utilizado (Tabela 3). Apesar do geotêxtil tecido possuir a maior resistência à tração no sentido de fabricação ensaiado (70 kN/m) em relação as geogrelhas de polipropileno (19,0 kN/m) e de fibra de vidro (50 kN/m), ele apresentou a menor resistência ao arrancamento. Isto se deve ao mecanismo de interação, que é puramente atritivo, que ocorre entre o geotêxtil tecido eo solo,. No caso das geogrelhas, há também a contribuição do contato solo-solo que existe na abertura da malha do geossintético e o desenvolvimento da resistência passiva que ocorre à frente dos elementos transversais. Esta última parcela costuma ser de maior contribuição que o atrito solo-superfície da inclusão.

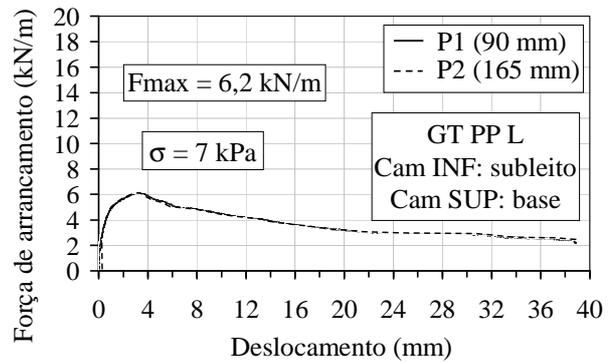


a)

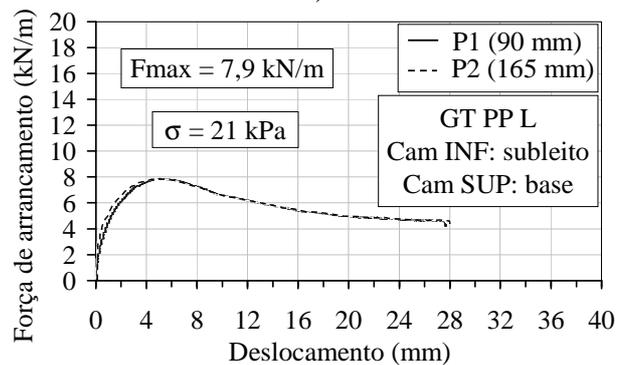


b)

Figura 5. Curvas Força x Deslocamento. a) Ensaio 3. b) Ensaio 4. Nota: F_{max} – Força de Arrancamento Máxima; σ - Sobrecarga; Cam – Camada; INF – Inferior; SUP – Superior; GG – Geogrelha; PP – Polipropileno; T – Transversal (sentido de fabricação); Números entre parêntesis - distância do ponto em relação à parede frontal da caixa de arrancamento.



a)



b)

Figura 6. Curvas Força x Deslocamento. a) Ensaio 5. b) Ensaio 6. Nota: F_{max} – Força de Arrancamento Máxima; σ - Sobrecarga; Cam – Camada; INF – Inferior; SUP – Superior; GT – Geotêxtil tecido; PP – Polipropileno; L – Longitudinal (sentido de fabricação); Números entre parêntesis - distância do ponto em relação à parede frontal da caixa de arrancamento.

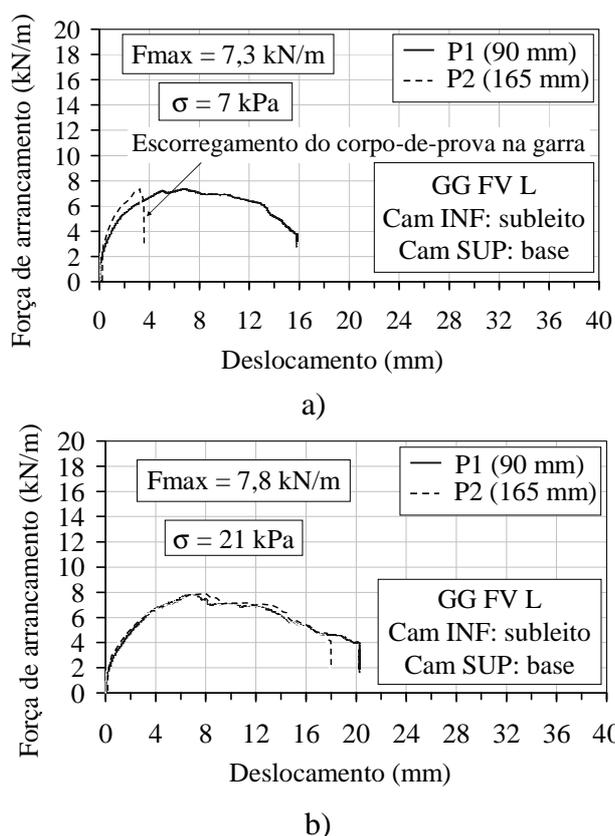


Figura 7. Curvas Força x Deslocamento. a) Ensaio 7. b) Ensaio 8. Nota: Fmax – Força de Arrancamento Máxima; σ - Sobrecarga; Cam – Camada; INF – Inferior; SUP – Superior; GG – Geogrelha; FV – Fibra de vidro; L – Longitudinal (sentido de fabricação); Números entre parêntesis - distância do ponto em relação à parede frontal da caixa de arrancamento.

Analisando as Figuras 7 e 6, percebe-se que para sobrecarga de 7 kPa o pico da força de arrancamento foi maior na geogrelha de fibra de vidro (7,33 kN/m) que no geotêxtil tecido de polipropileno (6,15 kN/m). Entretanto, para sobrecarga de 21 kPa, os valores máximos dos dois sistemas foram semelhantes com 7,77 e 7,89 kN/m de força máxima para a geogrelha FV e o geotêxtil PP, respectivamente. Com o aumento da tensão de confinamento, seria esperado que o ganho de resistência ao arrancamento da geogrelha FV fosse maior que do geotêxtil PP devido à melhora do contato solo-solo entre as áreas vazias da geogrelha. Dessa forma, a ação de corte dos membros transversais seria dificultada e a contribuição da resistência passiva aumentada.

No entanto, a geogrelha de fibra de vidro apresentou baixo desempenho para a sobrecarga

maior. Isto se deve, provavelmente, à ruptura da inclusão em vários pontos durante o arrancamento, ao baixo coeficiente de atrito de interface e à baixa resistência das conexões entre membros longitudinais e transversais. Este foi o único geossintético dentre os utilizados que sofreu ruptura de elementos. Vale salientar que o ensaio de arrancamento é um procedimento bastante agressivo e que condições tão severas quanto estas não ocorrem em campo. Porém, uma das desvantagens do uso de geogrelhas de fibra de vidro é que este é um material bastante sensível aos danos de instalação provocados pelo pedregulho.

Diante disto, foi realizado o ensaio de danos de instalação da geogrelha. Inicialmente, procedeu-se os ensaios de tração com a amostra virgem e depois com o material danificado. Os resultados com os corpos-de-prova virgens mostraram grande variabilidade na resistência da geogrelha FV, evidenciando a necessidade de melhoras no seu processo de fabricação. A resistência à tração média foi de 51,4 kN/m, com uma variância de 20,6%. Após sofrer os danos de instalação, a resistência média do material atingiu 24,1 kN/m, com variância de 14,2%. Portanto, a resistência à tração da geogrelha de fibra de vidro após os danos de instalação é um pouco menor que a metade de sua resistência na condição intacta. É importante salientar que o pedregulho utilizado como camada de base tem formato angular e, por isso, é muito agressivo ao geossintético.

Em reforço de base de pavimentos, a rigidez inicial do sistema é mais importante que a resistência máxima ao arrancamento. A Figura 8 exibe as curvas do módulo de rigidez (J) x deformação inicial dos ensaios 2, 4 e 6 (sobrecarga de 21 kPa). O módulo de rigidez (J) é definido como a razão entre a força de arrancamento e a deformação do geossintético em determinado instante do ensaio. Como o ensaio de arrancamento possui dimensões reduzidas, garante-se a mobilização completa do reforço e, desse modo, é possível obter a deformação do corpo-de-prova durante o ensaio.

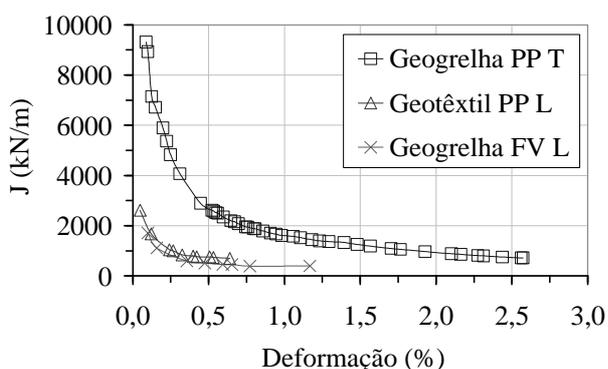


Figura 8. Curvas Rigidez x Deformação dos Ensaios 4, 6 e 8 (sobrecarga 21 kPa). Nota: T – Transversal (sentido de fabricação); L – Longitudinal (sentido de fabricação); PP – Polipropileno; FV – Fibra de vidro.

Analisando a Figura 8, percebe-se que a curva da geogrelha de polipropileno é a que apresenta maior rigidez para todos os valores de deformação, seguida do geotêxtil tecido de polipropileno e da geogrelha de fibra de vidro. Apesar da geogrelha PP possuir a menor resistência à tração no sentido ensaiado (19,0 kN/m) em relação à geogrelha FV (50 kN/m) e ao geotêxtil PP (70 kN/m), ela mostra ser o reforço que confere a maior rigidez ao sistema. Isto se deve, provavelmente, à maior resistência das conexões entre membros longitudinais e transversais da geogrelha PP em comparação à geogrelha FV. Portanto, dentre os materiais estudados nesta pesquisa, a geogrelha PP é a melhor opção na utilização de geossintéticos posicionados na interface da camada de base-subleito com a função de reforço de base de pavimentos de obras viárias.

4 CONCLUSÕES

Neste estudo, foram realizados ensaios de arrancamento de pequeno porte visando avaliar o desempenho de geossintéticos no reforço de base de pavimentos viários, fabricados com diferentes polímeros e características geométricas distintas. Três geossintéticos foram estudados: uma geogrelha e um geotêxtil tecido de polipropileno e uma geogrelha de fibra de vidro. Dois tipos de solo foram utilizados: um argiloso, simulando subleito de rodovias, e um pedregulho areno-siltoso como camada de base.

As principais conclusões desta pesquisa são:

- Com o ensaio de arrancamento de pequenas dimensões, em conjunto com o medidor de deslocamentos a laser para obtenção dos deslocamentos ao longo da inclusão, garante-se a completa mobilização do corpo-de-prova. Desta forma, é possível obter medidas de deformações do geossintético.
- Os ensaios de arrancamento mostraram que, dos materiais testados, a geogrelha de polipropileno conferiu a maior rigidez ao sistema, sendo o material mais efetivo no reforço de base de pavimentos viários posicionados na interface camada de base-subleito. O geotêxtil tecido de polipropileno é o segundo melhor, seguido da geogrelha de fibra de vidro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de mestrado concedida ao primeiro autor, ao Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP) pelo suporte técnico e ao Ranjiv Gupta, aluno de doutorado da Universidade do Texas em Austin, pelo envio de materiais utilizados na pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ASTM D 6706-01 (2001). *Standard test method for measuring geosynthetics pullout resistance in soil.*
- ASTM D 698-00a (2000). *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)).*
- Gupta, R. (2006). *Publicação eletrônica* [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <zambrano@sc.usp.br> em 31 ago.
- Lambe, T. W.; Whitman, R. V. (1979). *Soil Mechanics: SI Version.* John Wiley & Sons, Singapore, p. 149.

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ_s – Massa específica dos sólidos

w_L – Limite de liquidez

w_P – Limite de plasticidade

IP – Índice de plasticidade

$\rho_{d,max}$ – Massa específica seca máxima

w_{ot} – Umidade ótima

ϕ' – Ângulo de atrito interno efetivo do solo

c – Intercepto de coesão do solo

GC – Grau de compactação