



ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NA INTERFACE GEOTÊXTIL NÃO TECIDO - SOLO ARGILOSO

**MARIA JOSÉ AYRES ZAGATTO PENHA¹; JOSÉ LEOMAR FERNANDES JÚNIOR²;
DANILO RINALDI BISCONSINI³& LUIZ ANTÔNIO SERAPHIM⁴**

RESUMO

O presente trabalho mostra a variação da resistência ao cisalhamento na interface entre o solo argiloso compactado e geotêxtil. Utiliza-se um equipamento de cisalhamento direto, com solo compactado na umidade ótima e energia normal da compactação. A resistência ao cisalhamento do solo é avaliada tanto no teor de umidade ótima, bem como em condição de saturação, enquanto que a resistência na interface com o geotêxtil é medida apenas em condição de saturação. Também foi avaliada a resistência de amostras de solo colocadas sob areia, envoltas em tiras de geotêxtil que foram usados nos testes e submetidos a variações ambientais durante três, sete e catorze meses (três diferentes conjuntos de amostras). Os resultados mostram uma variação da aderência na interface solo-geotêxtil, o que pode ser útil para o melhoramento dos cálculos da estabilidade do solo reforçado.

PALAVRAS-CHAVE: resistência ao cisalhamento, interface, solo argiloso, geotêxtil.

ABSTRACT

This work shows the variation in shear strength in the interface between compacted fine grained soil and geotextile. It uses a direct shear equipment, with compacted soil at optimum moisture content and normal energy of compaction. The shear strength of the soil is assessed both at the optimum moisture content as well as at the saturated condition, while the resistance at the interface with the geotextile is measured only at the saturated condition. It is also evaluated the strength of soil-geotextile samples placed under sand, wrapped in geotextile strips that were used in the tests, which were subjected to the local weather during three, seven and fourteen months (three different sets of samples). The results show variation of the adhesion in the interface soil-geotextile, what can be useful for the improvement of the calculations of the stability of reinforced soils.

KEY WORDS: shear strength, interface, fine grained soil, geotextile.



INTRODUÇÃO

O primeiro geossintético utilizado na área geotécnica foi o geotêxtil. No Brasil, a utilização de geossintéticos iniciou-se no início da década de 1970, em sistemas de drenagem. Por exemplo, no caso de aterros de solos argilosos suportados por muro de retenção, um geotêxtil não tecido grosso pode ser usado na interface para melhorar o fluxo de água de uma forma simples e econômica, prevenindo o desenvolvimento de pressão hidrostática. Outro exemplo de aplicação de geossintéticos pode ser verificado na drenagem vertical para a consolidação de solos compressíveis.

Na década de 1980 foi realizada a primeira obra de grande porte com o uso de geotêxtil, em uma estrada construída em uma região montanhosa do Estado de São Paulo, para reforço de solo e de estabilização de um talude de 30 m de altura (Wolle e Carvalho, 1992). Posteriormente os geotêxteis não-tecidos foram utilizados como elementos de reforço em aterros sobre solos moles e muros de solo reforçado.

Apesar dos possíveis benefícios econômicos e ambientais decorrentes da utilização de solos coesivos e restos de construção reforçados com geossintéticos, a sua aplicação, incluindo os métodos e técnicas de projeto ainda precisam ser estudados com maior profundidade (Zornberg, 2013). Portanto, a resistência ao cisalhamento na interface solo argiloso - geotêxtil não tecido é um dos mecanismos que precisa ser melhor compreendido.

Este trabalho pretende mostrar, através de ensaios de cisalhamento direto, a variação da resistência ao cisalhamento na interface de solo argiloso compactado e geotêxtil não tecido em função da umidade. Ele também testou amostras de solo compactado expostas às condições ambientais por diversos períodos de exposição (3, 7 e 14 meses), a fim de detectar a possível variação da resistência ao cisalhamento com o tempo.

RESISTÊNCIA DE CISALHAMENTO

O critério de Mohr-Coulomb relaciona a máxima resistência ao cisalhamento de um solo e a tensão normal aplicada. Através dela, ficou estabelecido que a resistência ao cisalhamento é função de duas componentes básicas: o ângulo de atrito entre as partículas constituintes e a coesão.

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg}(\phi) \quad (1)$$

Onde ‘ τ ’ é a resistência ao cisalhamento, ‘ c ’ é a coesão, ‘ σ ’ é a tensão normal aplicada e ‘ ϕ ’ é o ângulo de atrito entre as partículas constituintes.

Considerando que somente as tensões efetivas mobilizam a resistência ao cisalhamento, devem ser consideradas as pressões na água nos vazios de um solo quando saturado, ‘ u ’, e a equação passa a ser escrita da seguinte maneira:

$$\tau = c + (\sigma-u) \cdot \operatorname{tg}(\phi) \quad (2)$$

Segundo Tupa e Palmeira (1995), a interação solo-geossintético depende das características do solo envolvente e das características do reforço. A quantificação desta interação envolve a determinação



do coeficiente de atrito e da adesão na interface solo-geossintético. A resistência de interface é representada pela seguinte equação:

$$\tau = a + \sigma \cdot \operatorname{tg}(\delta) \quad (3)$$

Onde: τ é a resistência ao cisalhamento na interface, ‘a’ é a adesão solo-geossintético, ‘ σ ’ é a pressão normal aplicada à interface e ‘ δ ’ é o ângulo de atrito na interface solo-geossintético. Segundo aqueles autores, podem ser definidos os parâmetros de resistência de interface a partir da equação (3), ‘a’ e ‘ δ ’, expressos em função dos parâmetros de resistência do solo em contato (c e ϕ) e dos coeficientes de aderência (λ e f), definidos como:

$$\lambda = a / c \quad (4)$$

$$f = \operatorname{tg}(\delta) / \operatorname{tg}(\phi) \quad (5)$$

A Equação 3 passa, então, a ser escrita da seguinte maneira:

$$\tau = \lambda \cdot c + f \cdot \sigma \cdot \operatorname{tg}(\phi) \quad (6)$$

Os parâmetros de aderência expressos em termos de drenados ou não drenados, dependendo do tipo de carregamento, das características dos materiais envolvidos.

MATERIAIS

Foi utilizado um solo argiloso, vermelho, de decomposição de diabásio, classificação CL conforme a classificação internacional (ASTM) e A7-6 segundo a classificação HRB. Sua compactação foi executada através da energia Proctor normal, em condições de umidade ótima. As propriedades do solo ensaiado se encontram na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades do solo ensaiado

Limite de Liquidez (%)	47
Limite de Plasticidade (%)	32
Índice de Plasticidade (%)	15
Peso Esp. dos Grãos (kN/m ³)	28,2
Peso Esp. Seco Máximo (kN/m ³)	16,1
Umidade Ótima (%)	23,5
Ângulo de Atrito (°)	27,3
Coesão (kPa)	80,0

O geotêxtil não tecido utilizado é constituído por filamentos contínuos de poliéster, não tecido, agulhado, com as características técnicas apresentadas na tabela 2.



4ª Expopavimentação

Os caminhos da integração . O maior evento rodoviário do País.

18 a 21 de agosto de 2015 . Hotel Bourbon . Foz do Iguaçu . PR

Tabela 2. Características técnicas do geotêxtil utilizado

μ (g/cm ²)	T _{máx} (kN/m)	$\varepsilon_{máx}$ (%)	J (kN/m)	t _{GT} (mm)
300	22	35	71	2,7

Onde: μ é a gramatura, T_{máx} é a resistência à tração, $\varepsilon_{máx}$ é a deformação na ruptura, J é a rigidez à tração e t_{GT} é a espessura do geotêxtil.

O espaçamento entre as caixas manteve a espessura do geotêxtil, que por sua vez, permaneceu ancorado no equipamento de cisalhamento direto. O solo teve sua resistência avaliada tanto na umidade de compactação quanto saturado, com a resistência em ensaios de interface com o geotêxtil em condições saturadas.

Também foram moldados corpos de prova que ficaram expostos às variações ambientais, juntamente com o geotêxtil a ser usado no ensaio, cujas amostras foram ensaiadas após 3, 7 e 14 meses de exposição.

As tensões aplicadas variaram entre 50 e 250 kPa, e a velocidade de cisalhamento foi a mesma para todos os ensaios e igual a 0,133mm/min.

Além da escolha do método de ensaio, um dos fatores importantes para a variação de resultados de diversas pesquisas da área, são os métodos e técnicas utilizadas para ancorar as camadas de geossintéticos dentro dos equipamentos de teste. Esta pode ser a principal causa de variações de resultados obtidos em trabalhos do ramo (Ramsey e Nyirenda, 2014).

Existem duas formas de se executar a montagem do sistema solo-geotêxtil. O solo pode estar colocado como uma camada de cobertura, na metade superior da caixa, ou preenchendo ambas as caixas de cisalhamento. Neste trabalho, os ensaios foram realizados utilizando solo nas duas metades da caixa, com o geotêxtil ancorado (Figura 1 k).

MÉTODOS

O local escolhido para a retirada de solo era de fácil acesso e permitia a coleta de quantidade suficiente de solo com características representativas semelhantes para a repetição dos ensaios. Com este solo foram realizados ensaios de caracterização e compactação.

Os corpos de prova que ficaram expostos às variações ambientais foram moldados com o mesmo grau de compactação. Estes corpos de prova foram compactados na energia Proctor normal, enrolados com faixas de geotêxtil e assentados sobre uma manta do mesmo geotêxtil. Todo o conjunto de corpos de prova foi posteriormente coberto por outra manta sobre a qual foi espalhada areia e deixados expostos ao tempo.

O equipamento utilizado foi o aparelho de cisalhamento direto, constituído por caixas inferior e superior quadradas, com 10 cm de lado e 1,5 cm de altura cada. O solo foi usado em condições de umidade ótima com e sem geotextil na interface, e também em estado saturado. As amostras que



4ª Expopavimentação

Os caminhos da integração . O maior evento rodoviário do País.

18 a 21 de agosto de 2015 . Hotel Bourbon . Foz do Iguaçu . PR

ficaram expostas às condições ambientais foram testadas somente no estado saturado.

Nesta pesquisa, os ensaios de cisalhamento direto em condições de saturação foram realizados com carregamento prévio e posterior inundaçāo. Foi adaptada uma bureta junto à caixa de cisalhamento, para verificação do tempo provável de saturação das amostras. Verificou-se que o tempo de 24 horas era suficiente para que se estabilizasse o nível na bureta.

O procedimento completo descrito neste item pode ser verificado pela figura 1.



Figura 1a) Corpo de prova sendo envolto pelo geotêxtil



Figura 1b) Corpo de prova envolto pelo geotêxtil



Figura 1d) Corpos de prova sobre a manta geotêxtil



Figura 1f) Conjunto sendo coberto por areia



Figura 1g) Conjunto exposto às variações ambientais



Figura 1h) Corpo de prova sendo desenterrado

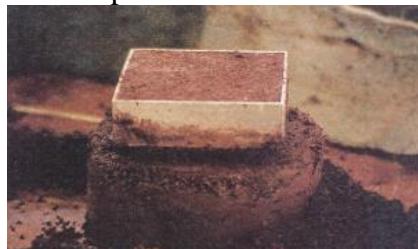


Figura 1i) Moldagem do anel



Figura 1j) Primeira metade de solo posicionada na caixa

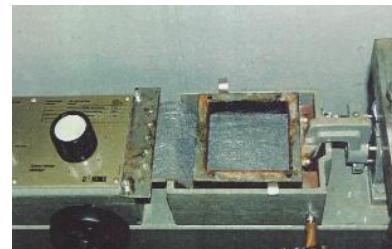


Figura 1k) Ancoragem e adaptação do geotêxtil

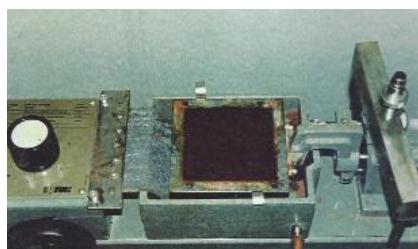


Figura 1l) Segunda metade de solo posicionada na caixa



Figura 1m) Vista do aparelho de cisalhamento



Figura 1n) Vista do aparelho de cisalhamento

Figura 1. Sequência da execução dos procedimentos realizados



RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados por Penha (1999) são mostrados estão apresentados a seguir por meio de gráficos que relacionam a tensão cisalhante no plano de cisalhamento na ruptura (τ), e a tensão normal ao plano de cisalhamento na ruptura (σ)

A Figura 2 mostra a envoltória de resistência do solo compactado na umidade ótima, sem inclusão de geotêxtil entre as camadas e ensaiado sem saturação. Desta envoltória foram obtidos os seguintes valores:

Ângulo de atrito (Φ) = 27,3°

Coesão (c) = 80 kPa

Coeficiente de Correlação (R^2) = 0,9267

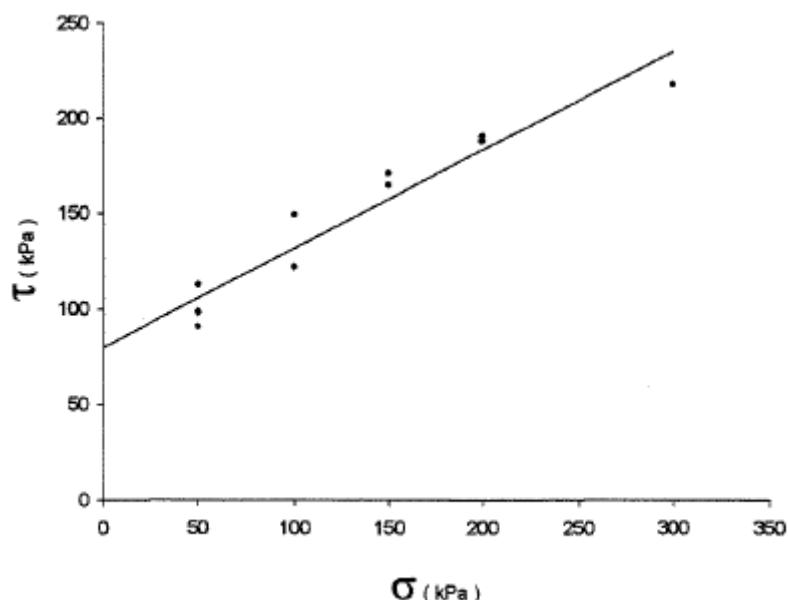


Figura 2. Envoltória de resistência do solo, sem inclusão do geotêxtil e sem saturação

A Figura 3 mostra a envoltória de resistência do solo compactado na umidade ótima, sem inclusão de geotêxtil entre as camadas e ensaiado sem saturação. Desta envoltória foram obtidos os seguintes valores:

Ângulo de atrito (δ) = 28,4°

Adesão (a) = 21 kPa

Coeficiente de Correlação (R^2) = 0,9483

Coeficientes de Aderência (λ) = 0,26; (f) = 1,05



4ª Expopavimentação

Os caminhos da integração . O maior evento rodoviário do País.

18 a 21 de agosto de 2015 . Hotel Bourbon . Foz do Iguaçu . PR

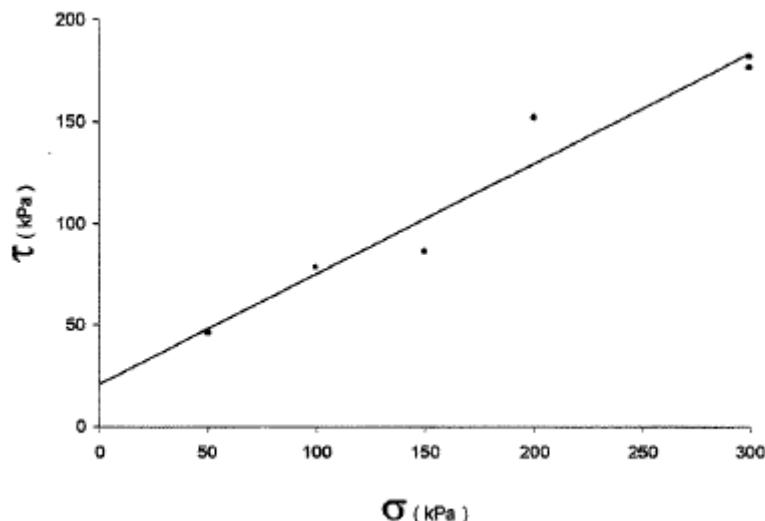


Figura 3. Envoltória de resistência do solo, com geotêxtil na interface e sem saturação

A Figura 4 mostra a envoltória de resistência do solo compactado, sem geotêxtil na interface e em condições de saturação. Desta envoltória foram obtidos os seguintes valores:

Ângulo de atrito (Φ) = 26,1°

Coesão (c) = 35,8 kPa

Coeficiente de Correlação (R^2) = 0,9694

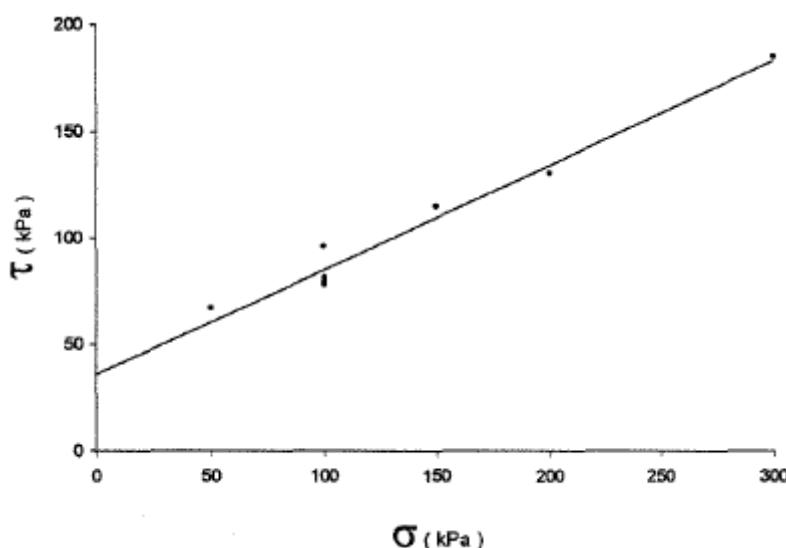


Figura 4. Envoltória de resistência do solo, sem inclusão de geotêxtil entre as camadas e em condições de saturação

A Figura 5 mostra a envoltória de resistência do solo compactado, com geotêxtil na interface e em condições de saturação. Desta envoltória foram obtidos os seguintes valores:

Ângulo de atrito (δ) = 24,4°



4ª Expopavimentação

Os caminhos da integração . O maior evento rodoviário do País.

18 a 21 de agosto de 2015 . Hotel Bourbon . Foz do Iguaçu . PR

Adesão (a) = 7,6 kPa

Coeficiente de Correlação (R^2) = 0,9233

Coeficientes de Aderência (λ) = 0,21; (f) = 0,93

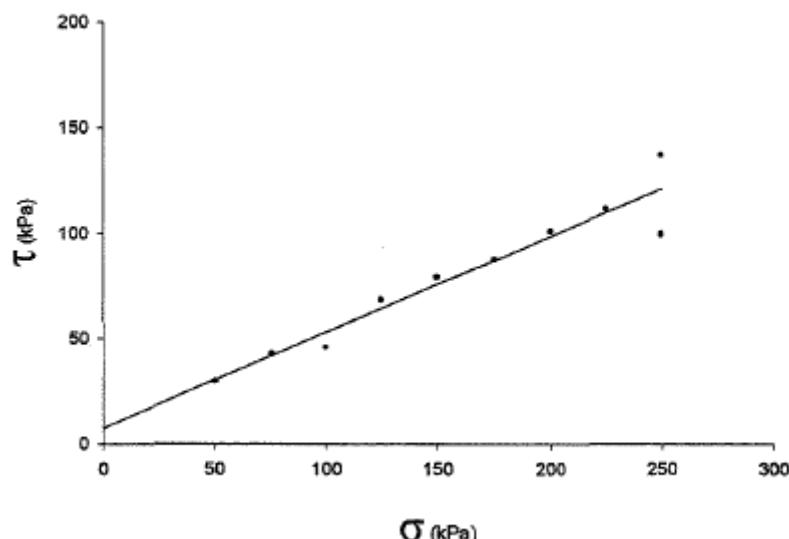


Figura 5. Envoltória de resistência do solo, com geotêxtil na interface e em condições de saturação

A Figura 6 mostra a envoltória de resistência do solo compactado, que ficou exposto ao tempo por um período de 03 meses, com geotêxtil na interface e em condições de saturação. Desta envoltória foram obtidos os seguintes valores:

Ângulo de atrito (δ) = 27,6°

Adesão (a) = 5,2 kPa

Coeficiente de Correlação (R^2) = 0,9952

Coeficientes de Aderência (λ) = 0,15; (f) = 1,07

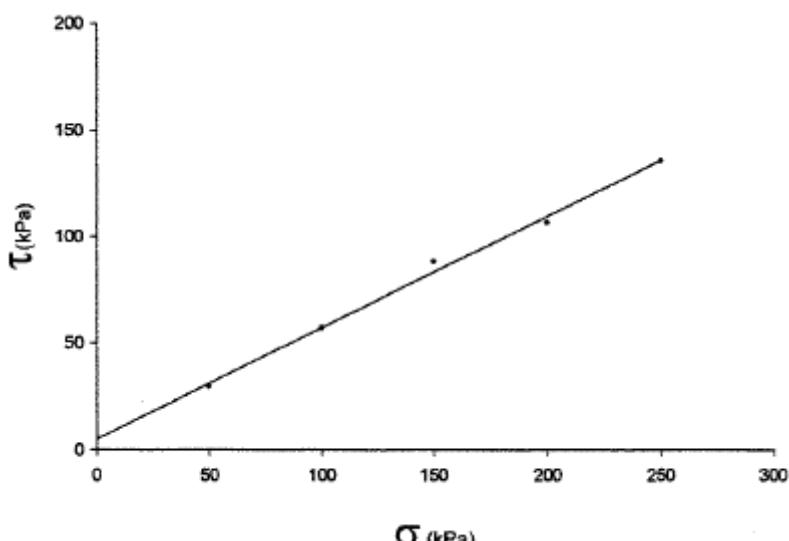


Figura 6. Envoltória de resistência: solo exposto por 03 meses, com geotêxtil na interface e em condições de saturação



4ª Expopavimentação

Os caminhos da integração . O maior evento rodoviário do País.

18 a 21 de agosto de 2015 . Hotel Bourbon . Foz do Iguaçu . PR

A Figura 7 mostra a envoltória de resistência do solo compactado, que ficou exposto ao tempo por um período de 07 meses, com geotêxtil na interface e em condições de saturação. Desta envoltória foram obtidos os seguintes valores:

Ângulo de atrito (δ) = 27,7°

Adesão (a) = 4,6 kPa

Coeficiente de Correlação (R^2) = 0,9471

Coeficientes de Aderência (λ) = 0,13; (f) = 1,07

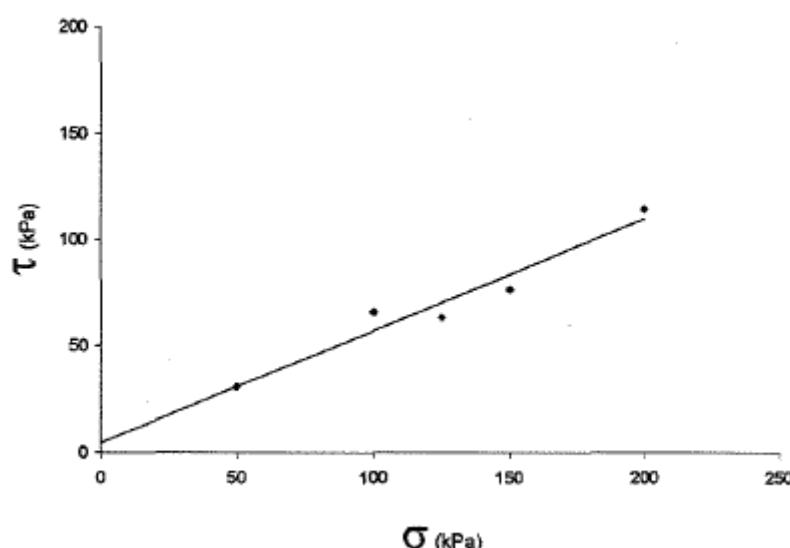


Figura 7. Envoltória de resistência: solo exposto por 07 meses, com geotêxtil na interface e em condições de saturação

A Figura 8 mostra a envoltória de resistência do solo compactado, que ficou exposto ao tempo por um período de 14 meses, com geotêxtil na interface e em condições de saturação. Desta envoltória foram obtidos os seguintes valores:

Ângulo de atrito (δ) = 27,7°

Adesão (a) = 8 kPa

Coeficiente de Correlação (R^2) = 0,9537

Coeficientes de Aderência (λ) = 0,22; (f) = 1,07



4ª Expopavimentação

Os caminhos da integração . O maior evento rodoviário do País.

18 a 21 de agosto de 2015 . Hotel Bourbon . Foz do Iguaçu . PR

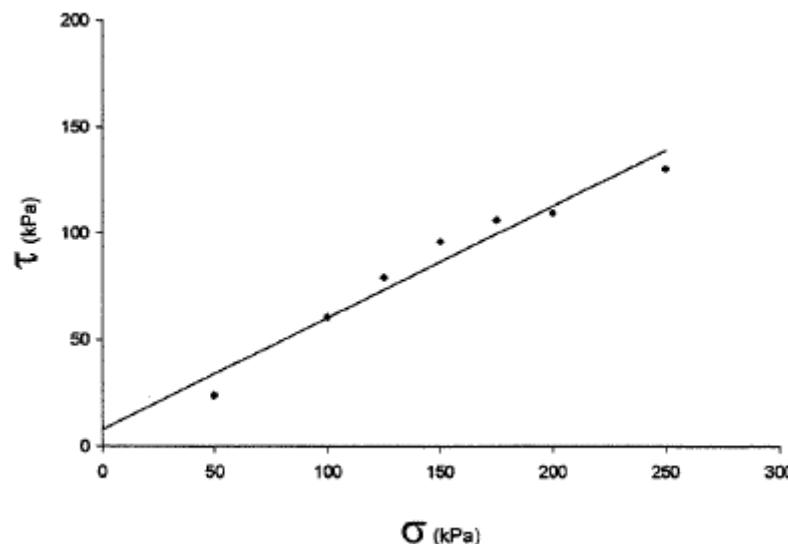


Figura 8. Envoltória de resistência: solo exposto por 14 meses, com geotêxtil na interface e em condições de saturação

A tabela 3 traz um resumo dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto apresentados anteriormente.

Tabela 3. Resultados dos testes de cisalhamento direto

Interface	Φ (°)	δ (°)	c (kPa)	a (kPa)	λ	f
Solo x Solo	27,3	-	80	-	-	-
Solo x Solo (Saturado)	26,1	-	35,8	-	-	-
Solo x Geotextil	-	28,4	-	21	0,26	1,05
Solo x Geotextil (Saturado)	-	24,4	-	7,6	0,21	0,93
Solo x Geotextil – 3 meses (Saturado)	-	27,6	-	5,2	0,15	1,07
Solo x Geotextil – 7 meses (Saturado)	-	27,7	-	4,6	0,13	1,07
Solo x Geotextil – 14 meses (Saturado)	-	27,7	-	8	0,22	1,07

Onde: a - adesão solo-geossintético; δ – ângulo de atrito da interface; c – coesão; ϕ – ângulo de atrito entre as partículas constituintes; σ – tensão normal aplicada à interface; τ - resistência ao cisalhamento; λ e f – parâmetro de aderência.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste trabalho houve variação do teor de umidade dos corpos de prova que ficaram expostos às variações ambientais. Corpos de prova expostos por 07 meses apresentaram umidade variando entre 30,1 e 31,9%. Corpos de prova expostos por 14 meses, entre 22,3 e 29,7%. Devido a esta variação de umidade, que influiu na resistência final, optou-se por realizar ensaios com as amostras inundadas.

O solo ensaiado sem saturação apresentou valores de coeficiente de aderência f superior a 1,00 (f =



4ª Expopavimentação

Os caminhos da integração . O maior evento rodoviário do País.

18 a 21 de agosto de 2015 . Hotel Bourbon . Foz do Iguaçu . PR

1,05) e o parâmetro $\lambda = 0,26$. Valores superiores a 1,00 podem ser atribuídos a dispersões naturais do ensaio (Tupa e Palmeira 1995). Quando o solo foi ensaiado em condições de saturação apresentou valores de coeficiente de aderência f entre 0,93 e 1,07 e o parâmetro λ , entre 0,12 e 0,22.

Em condições drenadas de cisalhamento os solos finos ensaiados por Tupa e Palmeira (1995) apresentaram coeficientes de aderência superiores a 0,75 para todos os tipos de geossintéticos utilizados. O parâmetro λ variou entre 0,1 e 0,43, dependendo do geossintético. De maneira geral, o geotêxtil apresentou maiores valores de coeficientes de aderência.

Verificou-se que a inclusão do geotêxtil entre as camadas de solo, quando ensaiado sem saturação gerou aumento insignificante no ângulo de atrito (de 27,3 ° para 28,4°) e sensível redução no valor obtido para a adesão (de 80 para 21 kPa), indo de encontro com os resultados observados por outros autores (Tupa; Palmeira, 1995; Vidal, 1998; Mello, 2001).

A inclusão do geotêxtil entre as camadas de solo, quando ensaiado em condições de saturação, gerou redução no ângulo de atrito (de 26,1° para 24,4°) e grande redução no valor obtido para adesão (de 35,8 para 7,6 kPa).

Os ensaios de cisalhamento direto realizados com os corpos de prova que ficaram expostos frente às variações ambientais forneceram os seguintes resultados:

- Para aqueles que permaneceram 03 meses expostos houve aumento no valor do ângulo de atrito (de 24,4° para 27,6°) e redução no valor da adesão (de 7,6 kPa para 5,2 kPa);
- Para aqueles que permaneceram 07 meses expostos houve aumento no valor do ângulo de atrito (de 24,4° para 27,7°) e redução no valor da adesão (de 7,6 kPa para 4,6 kPa);
- Para aqueles que permaneceram 14 meses expostos houve o mesmo aumento no valor do ângulo de atrito (de 24,4° para 27,7°) e manutenção no valor da adesão.

Foi verificada a ocorrência de um processo de lavagem dos finos do solo expostos ao tempo (lixiviação). Este fato pode ser justificado através do ensaio de sedimentação realizado com o material retirado do topo dos corpos de prova que permaneceram expostos. A variação na composição granulométrica do solo que ficou exposto está apresentada na tabela 4.

Este processo de lixiviação já havia sido observado por Seraphim (1996) em amostras compactadas do mesmo solo, submetidas a diferentes períodos de percolação d'água. Também foram observadas as marcas dos “contornos” destes corpos de prova na face inferior da manta de geotêxtil sobre a qual ficaram colocados e deixados no tempo, evidenciando a lixiviação e a passagem de finos através da manta.



4ª Expopavimentação

Os caminhos da integração . O maior evento rodoviário do País.

18 a 21 de agosto de 2015 . Hotel Bourbon . Foz do Iguaçu . PR

Tabela 1. Variação da composição granulométrica do solo

	Solo Natural	Solo exposto
Argila (%)	45	32
Silte (%)	35	48
Areia (%)	20	20

CONCLUSÕES

A saturação afeta a resistência do solo, principalmente a coesão, mas praticamente não afeta o ângulo de atrito. Quando o geotextil é incluso na interface entre as duas camadas de solo da amostra dentro da caixa de cisalhamento direto, ocorre uma pequena variação no ângulo de atrito, mas uma queda brusca na adesão entre o geotextil e o solo, quase chegando a zero.

Os testes realizados com amostras que foram submetidas às condições ambientais confirmaram a perda de adesão, quase chegando a zero, e o crescimento do ângulo de atrito. Isto provavelmente se deve ao processo de lixiviação da fração fina observada nas amostras expostas ao tempo.

É importante avaliar em quais condições o solo reforçado vai ser exposto, porque a saturação pode reduzir significativamente a resistência, como observado neste estudo, principalmente a coesão e a adesão na interface solo-geotêxtil.

REFERÊNCIAS

- [1] MELLO, L. G. R. (2001) *Estudo da Interação Solo-Geossintético em Taludes de Obras de Disposição de Resíduos*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-085A/01, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF.
- [2] PALMEIRA, E.M. (1993) *Curso de Estabilização e Reforço de Solos Introdução à Utilização de Geossintéticos*, Publicação GAPOO2B/93, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, DF.
- [3] PENHA, M.J.A.Z. (1999) *Algumas Considerações a Respeito da Resistência ao Cisalhamento na Interface Solo Argiloso-Geotêxtil Não Tecido*. Dissertação de Mestrado, Publicação P376a, Departamento de Geotecnia e Transportes, Universidade de Campinas, SP.
- [4] RAMSEY, B.; NYIRENDI, I. (2014) Practical guidance related to geosynthetic interface shear and frictional performance. *Civil Engineering*, South Africa.
- [5] SERAPHIM, L. A. (1996) Influência da Lixiviação na Colapsabilidade de Solo, *3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados*, Rio de Janeiro, RJ.
- [6] TUPA, N. e PALMEIRA, E.M. (1995) Estudo da Aderência entre Geossintéticos e Solos Finos e entre Diferentes Tipos de Geossintéticos, *Revista Solos e Rochas*, ABMSIABGE, São Paulo, SP.
- [7] VIDAL, D. (1998) Propriedades Físicas, Mecânicas e Hidráulicas dos Geossintéticos, *Curso sobre Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia e Meio Ambiente*, Instituto de Engenharia, São Paulo, SP.
- [8] WOLLE, C. M. e CARVALHO, P.A.S. (1992) Uma Experiência de Aterro Reforçado com Geotêxteis, *Seminário Sobre Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia*, Geossintéticos'92, Brasília, DF.
- [9] ZORNBERG, J.G. (2013) Geosynthetic-reinforced Pavement Systems. *Civil Engineering*. Disponível em: <http://www.ce.utexas.edu/prof/zornberg/publications_topic.html>. Acesso em 18 jan. 2015.