

ENSAIOS TRIAXIAIS EM SOLO REFORÇADO COM GEOGRELHAS

Triaxial tests in geogrid reinforced soil

Ana Cristina Castro Fontenla Sieira*

Alberto Sampaio Ferraz Jardim Sayão**

RESUMO – Este trabalho apresenta e discute os resultados de um programa de ensaios triaxiais em corpos de prova de solo reforçado com geogrelhas. Os ensaios foram executados em corpos de prova de areia e silte argiloso, reforçados com 1, 2 e 4 camadas de geogrelhas, sob diferentes níveis de confinamento. O objetivo destes ensaios consistiu em avaliar as variações de resistência e de rigidez do conjunto solo-geogrelha com a introdução de camadas horizontais de reforço. Em função das características geométricas da geogrelha ensaiada, foi utilizado um equipamento triaxial de grandes dimensões, pertencente ao Laboratório de Geotecnia do CEDEX, em Espanha. Os resultados indicaram um acréscimo de resistência e de rigidez com a introdução de camadas de reforço. A compressão dos corpos de prova também aumentou com o número de camadas de reforço, sugerindo que a introdução de elementos de reforço em uma massa de solo provoca um efeito similar ao do aumento do confinamento. Adicionalmente, foram discutidos os diferentes tipos de sollicitação do elemento de reforço durante os ensaios triaxiais. Estas sollicitações geram o efeito de aumento de confinamento e consequente o ganho de resistência.

ABSTRACT – This paper presents a discussion on the results of a series of triaxial tests on geogrid reinforced soil. These tests were carried out on specimens of a sandy soil and a clayey silt, reinforced with 1, 2 and 4 geogrid inclusions, under several confining levels. This investigation aimed at evaluating the changes in strength and stiffness with the introduction of horizontal reinforcing layers. Due to the geometric characteristics of the geogrid, all tests were made in a large triaxial device at the geotechnical laboratory of Cedex, in Spain. The results indicated an increase in strength and in stiffness when the number of geogrid layers increases. It was also noted that the volumetric compression of the reinforced soil also increased with the number of geogrid layers. This suggests that the inclusion of reinforcement elements in a soil mass causes an effect similar to an increase in effective confinement. In addition, the paper presents a discussion on the different loading modes of the reinforcement layers during the triaxial tests. These loadings induce an effect similar to an increase in confining stress, which results in an increase in strength of the reinforced soil.

PALAVRAS CHAVE – Solo reforçado, geogrelhas, ensaios triaxiais.

1 – INTRODUÇÃO

Um dos modos de melhorar as características de um maciço de solo consiste na introdução de elementos resistentes, convenientemente orientados. Em função das características destes elementos, observa-se um aumento de resistência e uma diminuição da deformabilidade do maciço. Neste método, designado por reforço de solos, o comportamento global do maciço é melhorado à custa da transferência de esforços para os elementos resistentes. Uma vez que a introdução dos esforços altera a estrutura global do maciço, o seu efeito é essencialmente estrutural.

* D.Sc., Professora Adjunta, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. E-Mail: sieira@uerj.br

** Ph.D., Professor Associado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. E-mail: sayao@puc-rio.br

A técnica de reforço de solos utiliza inclusões de materiais naturais ou sintéticos no solo. Assim sendo, a utilização de inclusões permite que as obras de terra possam ser construídas com geometria mais ousada e, portanto, redução de volume. Atualmente, as inclusões são dos mais variados tipos podendo ser feitas de fibras naturais ou sintéticas e materiais metálicos.

Os solos possuem em geral resistência elevada a esforços de compressão, porém baixa resistência a esforços de tração. Quando uma massa de solo é carregada verticalmente, ela sofre deformações verticais de compressão e deformações laterais de extensão (tração). Contudo, se a massa de solo estiver reforçada, os movimentos laterais são limitados pela reduzida deformabilidade do reforço. Esta restrição de deformações é obtida graças ao desenvolvimento de esforços de tração no elemento de reforço. Neste caso, o solo tende a mover-se em relação ao reforço gerando tensões cisalhantes na interface solo/reforço (Wheeler, 1996). A Fig. 1 ilustra o princípio básico do comportamento do solo reforçado.

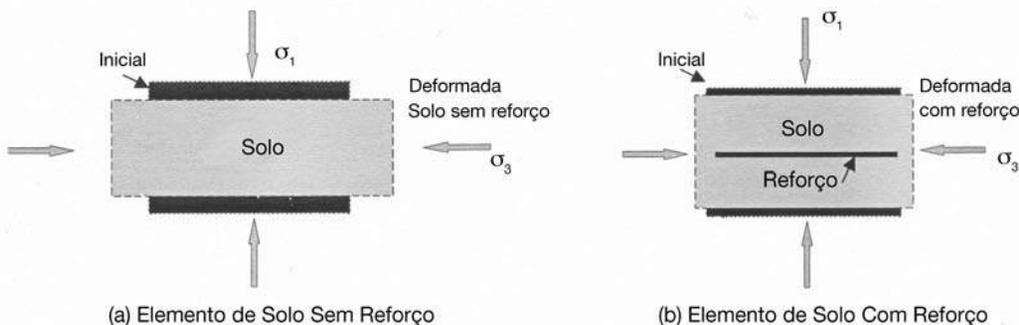


Fig. 1 – Elementos de solo com e sem reforço.

As tensões cisalhantes na interface são absorvidas pelo reforço, que é tracionado, causando uma redistribuição das tensões no solo. Essa redistribuição de tensões gera uma parcela de confinamento interno, adicional ao confinamento externo já existente.

A introdução de elementos de reforço exerce uma influência similar a um aumento de confinamento. O aumento da tensão lateral faz com que seja necessária uma tensão axial mais elevada para conduzir à ruptura do corpo de prova por cisalhamento.

Um solo não reforçado atinge a ruptura quando a tensão cisalhante excede a resistência ao cisalhamento do solo, em um determinado plano. Porém, quando a massa de solo está reforçada, a contribuição do reforço pode ser interpretada como sendo similar a um aumento do confinamento. Desta forma, para um mesmo estado de tensões externo, há um incremento da resistência ao cisalhamento do conjunto, como indica a Fig. 2. O círculo de Mohr desloca-se para a direita, devido ao aumento de σ_3 . Nesta Figura, está ilustrado o estado de tensões em uma amostra de solo não reforçado (círculo 1) e reforçado (círculo 2), em ensaio triaxial de carregamento axial. Percebe-se que a envoltória do solo reforçado, obtida a partir dos ensaios, indica a existência de uma coesão aparente do conjunto. O círculo correspondente ao acréscimo de tensão lateral (círculo 3) provocado pela presença do reforço também está ilustrado na Fig. 2.

Broms (1977) reporta ensaios triaxiais reforçados e mostra os efeitos benéficos obtidos através da inclusão de geotêxteis (Fig. 3). Os ensaios foram executados em areia densa, sob um nível de confinamento de 21kPa. Foram montados corpos de prova com 2, 3 ou 4 camadas de reforço. Os resultados mostraram que os reforços posicionados nas extremidades dos corpos de prova não contribuíram para um aumento de resistência durante o ensaio triaxial convencional. Ou seja, o reforço posicionado nas extremidades não é solicitado à tração durante o ensaio, não influenciando os resultados. Nos ensaios com 3 ou 4 camadas de reforço, pode-se observar ganhos de resistência significativos. Nestes casos, o geossintético é interceptado pelos planos potenciais de ruptura, ocasionando um aumento na tensão cisalhante.

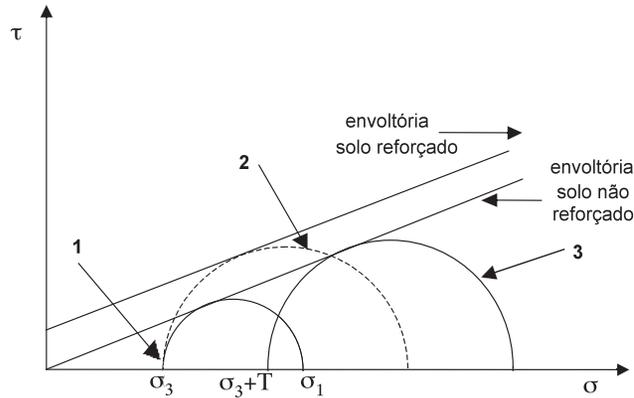


Fig. 2 – Aumento de resistência com a introdução do reforço.

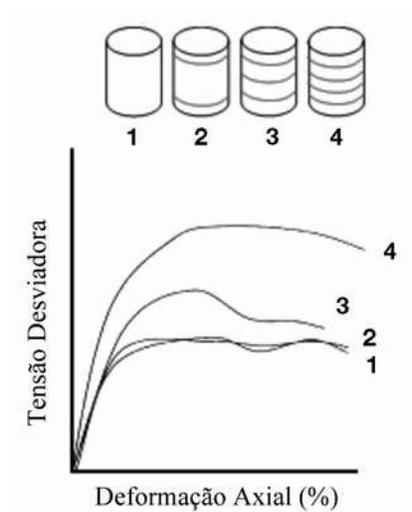


Fig. 3 – Ensaio triaxiais reforçados com geotêxteis (adaptado de Broms, 1977).

Rajagopal *et al.* (1999) executaram ensaios de compressão triaxial em corpos de prova de solo granular reforçado com múltiplas camadas de geocélulas, com o objetivo de avaliar o comportamento tensão versus deformação do conjunto. O efeito similar ao aumento de confinamento foi também observado.

Zhang *et al.* (2006) apresentam ensaios triaxiais em corpos de prova arenosos, reforçados com elementos tridimensionais de aço galvanizado. Os corpos de prova apresentavam 61,8mm de diâmetro e 135mm de altura. Além do acréscimo de intercepto coesivo (coesão aparente do conjunto), os autores observaram um aumento no ângulo de atrito interno do corpo de prova reforçado com relação ao corpo de prova não reforçado.

Gray e Ohashi (1983), Michalowski e Cermák (2003) e Park (2009) apresentam ensaios triaxiais reforçados com diferentes tipos de fibras. Nos ensaios apresentados por Park (2009), foram avaliadas diferentes formas de distribuição das fibras nos corpos de prova, como mostra a Fig. 4. Os autores observaram que a distribuição das fibras, ao longo de todo o corpo de prova (Caso 3), provoca um aumento significativo de resistência.

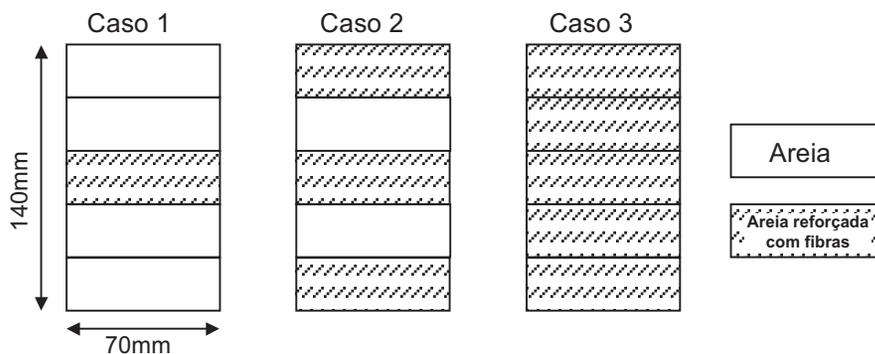


Fig. 4 – Ensaios triaxiais reforçados com fibras (adaptado de Park, 2009).

Os geossintéticos absorvem e redistribuem os esforços da matriz de solo, limitando as deformações laterais das estruturas reforçadas. A transferência favorável de tensões é controlada por dois fatores básicos: a resistência à tração do geossintético sob condições confinadas e a resistência ao arrancamento do geossintético da massa de solo.

Dois mecanismos distintos podem ocorrer durante os ensaios triaxiais em corpos de prova reforçados (Saez, 1997): o reforço pode ser tracionado ou pode se deslocar em relação ao solo envolvente.

No primeiro mecanismo, o reforço confere resistência à tração ao conjunto solo-reforço. O efeito benéfico do reforço é limitado pela resistência à tração do material (σ_G). No segundo mecanismo, ocorre o deslizamento entre o reforço e o solo circundante e o efeito benéfico do reforço é limitado pela resistência ao cisalhamento na interface (τ_{SG}).

Conforme os mecanismos ilustrados na Fig. 5, a tensão principal menor no instante da ruptura pode ser expressa por:

$$\sigma_{3f} = \sigma_3 + \sigma_G \quad (\text{reforço tracionado}) \quad (1)$$

$$\sigma_{3f} = \sigma_3 + \tau_{SG} \quad (\text{reforço se deslocando em relação ao solo}) \quad (2)$$

O presente trabalho apresenta os resultados de um programa de ensaios triaxiais executados em amostras de solo reforçado com geogrelhas. A campanha experimental teve como objetivo avaliar o ganho de resistência e rigidez do conjunto solo-geogrelha com a introdução de camadas horizontais de reforço.

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 – Considerações gerais

O programa experimental constou de 21 ensaios triaxiais consolidados-drenados (CD), com carregamento axial, executados com corpos de prova de areia e silte argiloso reforçados com uma geogrelha tecida. Foram executados ensaios sob tensões confinantes de 50, 150 e 300 kPa em um equipamento de grandes dimensões (22,9cm de diâmetro e 45,7cm de altura), no Laboratório de Geotecnia do Cedex, em Madrid. Estes ensaios fazem parte de um amplo programa experimental para o estudo da interação solo-geogrelha (Sieira e Sayão, 2002; Sieira *et al*, 2006; Sayão *et al*, 2009; Sieira e Sayão, 2009; Sieira *et al*, 2009).

Os itens subsequentes apresentam as principais características dos materiais ensaiados (geogrelha e solos) e do equipamento, bem como os procedimentos de ensaio.

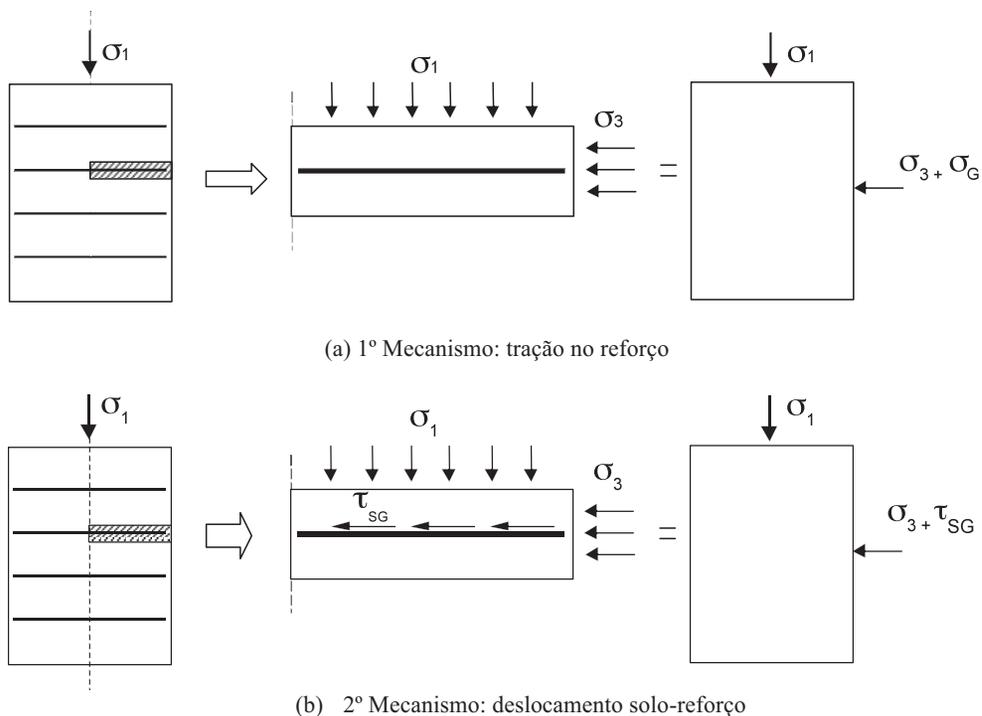


Fig. 5 – Mecanismos observados em ensaios triaxiais de solos reforçados com geossintéticos.

2.2 – Características da geogrelha

O programa de ensaios utilizou uma geogrelha de malha regular (MG), constituída por tiras tecidas de poliéster, com resistência nominal à tração igual a 97,0kN/m no sentido longitudinal, e 29,4kN/m no sentido transversal. Esta geogrelha possui aberturas quadradas de 20mm de lado e uma porcentagem de área sólida superficial disponível para atrito solo-geogrelha de 30%. O Quadro 1 apresenta as principais características físicas e mecânicas da geogrelha MG utilizada no programa experimental.

2.3 – Características dos solos

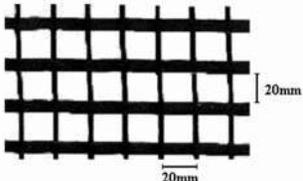
Os dois tipos de solo utilizados no programa experimental foram uma areia pouco siltosa bem graduada e um solo silto-argiloso. A escolha destes dois solos objetivou contribuir para a compreensão da influência das características do solo no mecanismo de interação solo-geogrelha.

Os ensaios de caracterização consistiram de distribuição granulométrica, limites de consistência, densidade real dos grãos e análise mineralógica.

A areia é constituída predominantemente por quartzo e feldspato e apresenta traços de illita e clorita. O solo silto-argiloso é composto por 40% de quartzo e feldspato e 60% de esmectita, clorita e caulinita. As curvas granulométricas estão ilustradas na Fig. 6, enquanto o Quadro 2 apresenta as principais características geotécnicas de ambos os solos utilizados no programa experimental.

Observa-se que as curvas granulométricas dos dois tipos de solo são aproximadamente paralelas, sendo que a areia tem diâmetro médio das partículas 7 vezes superior ao diâmetro médio das partículas do silte argiloso. A areia apresenta-se bem graduada, com um coeficiente de não uniformidade de 14,2.

Quadro 1 – Características físicas e mecânicas da geogrelha.

Físicas	Tipo de polímero	Poliéster com PVC
	Tipo de malha	Aberturas quadradas
	Processo de fabricação	Tecido
	Aberturas (mm)	20,0
	Largura dos elementos longitudinais (mm)	8,0
	Largura dos elementos transversais (mm)	3,0
Mecânicas	Resistência à tração longitudinal (kN/m)	97,0
	Resistência à tração transversal (kN/m)	29,4
	Alongamento máximo na ruptura (mm)	12,8
	Geogrelha MG	

Ensaio de compactação Proctor Normal foram executados com o solo silto-argiloso. A Fig. 7 apresenta a curva de compactação, juntamente com os valores de peso específico seco máximo e umidade ótima. Nota-se que o solo apresenta um peso específico seco máximo de $18,1 \text{ kN/m}^3$ e um teor de umidade ótima de 15,5%.

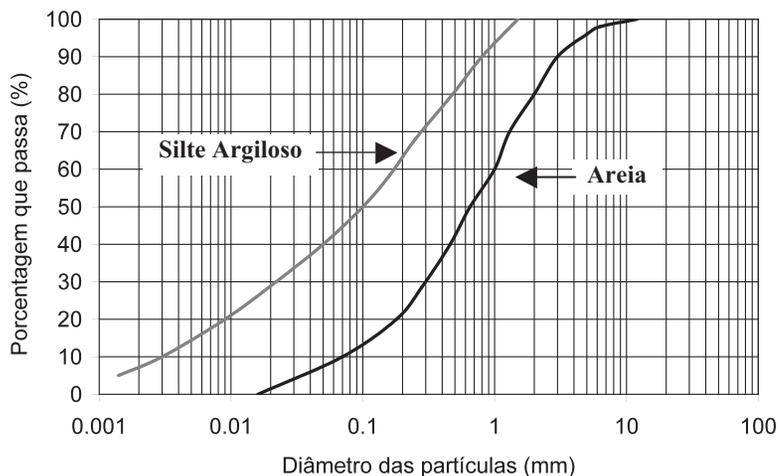


Fig. 6 – Curvas granulométricas dos solos arenoso e silto-argiloso.

Os parâmetros de resistência dos solos serão apresentados posteriormente, juntamente com os resultados dos ensaios triaxiais reforçados. Os ensaios em corpos de prova reforçados e não reforçados foram executados no mesmo equipamento triaxial de grandes dimensões, de forma a evitar erros decorrentes do efeito de escala.

Quadro 2 – Caracterização dos solos.

Tipo de Solo	Caracterização					
	G_s	LL (%)	LP (%)	D_{10} (mm)	C_u	C_c
Areia	2,71	–	–	0,07	14,2	1,28
Silte Argiloso	2,69	29,7	19,0	0,003	60,0	0,74

LEGENDA: G_s = densidade real dos grãos sólidos; LL = limite de liquidez; LP = limite de plasticidade; D_{10} = diâmetro efetivo dos grãos; C_u = coeficiente de não uniformidade; C_c = coeficiente de curvatura

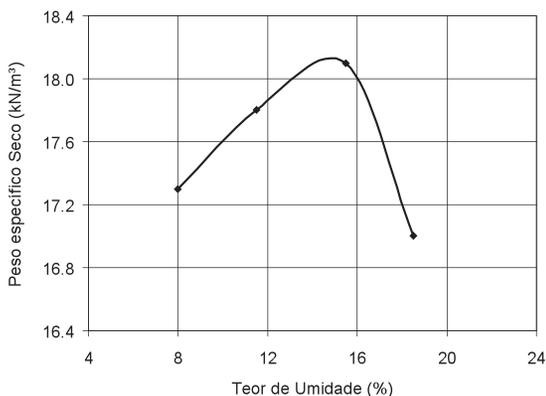


Fig. 7 – Ensaio de compactação proctor normal no silte argiloso.

2.4 – Descrição do equipamento

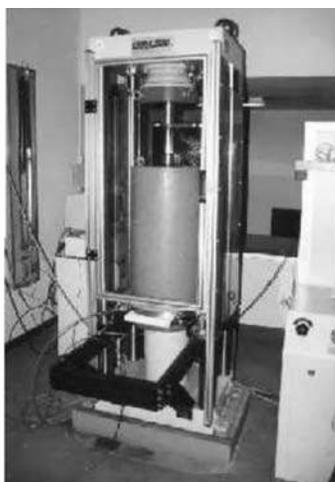
O equipamento utilizado para a série de ensaios triaxiais permite ensaiar corpos de prova cilíndricos de solo reforçado com 22,9cm (9”) de diâmetro e 45,7cm (18”) de altura. No programa de ensaios de solo reforçado com camadas horizontais de geogrelhas, deve-se ainda garantir que a relação entre a abertura da malha (S) e o diâmetro da amostra (φ) seja inferior a 1/5 (ASTM D5321). A geogrelha utilizada na presente série de ensaios possui uma abertura de 2,0cm, com razão $S/\varphi = 0,087$, inferior, portanto, à razão máxima recomendada.

A Fig. 8 apresenta o equipamento, constituído de uma célula triaxial metálica (Fig. 8a), capaz de suportar tensões confinantes de até 1,0GPa, aplicadas por meio de colunas de mercúrio (Fig. 8b). Uma prensa hidráulica, utilizada para carregamento axial, era capaz de aplicar uma carga máxima de 982kN (100t), com o controle da velocidade de carregamento. Um sistema automático de aquisição de dados era dedicado ao equipamento triaxial.

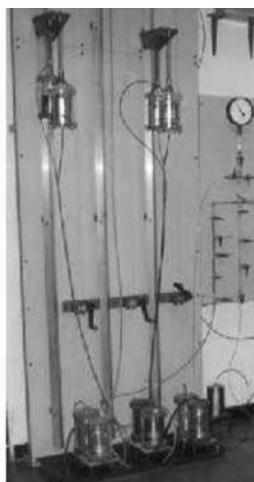
2.5 – Procedimento de ensaio

O processo de moldagem dos corpos de prova foi realizado em um molde metálico cilíndrico, que se encontrava acoplado a um compactador mecânico.

Uma vez definidos os valores de peso específico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e umidade ótica (ω_{ot}), iniciava-se o processo de compactação. Os corpos de prova foram compactados em 5 camadas, sendo aplicados 60 golpes em cada camada. A energia de compactação imposta aos corpos de prova era igual à energia do ensaio de Proctor Modificado (2,632 J/cm³).



(a) Prensa



(b) Colunas de Mercúrio

Fig. 8 – Detalhes do equipamento triaxial de grandes dimensões (Sieira *et al.*, 2005).

A fim de garantir a estabilidade do corpo de prova durante a retirada do molde metálico, utilizou-se uma membrana flexível de borracha (látex) dentro do molde (Fig. 9a). Terminado o processo de compactação do solo, o molde era retirado e o corpo de prova era colocado na célula triaxial entre placas porosas drenantes. Adicionalmente, bandas de papel filtro eram colocadas na superfície lateral dos corpos de prova de silte argiloso, de modo a reduzir a distância máxima de drenagem e acelerar o processo de adensamento. A Fig. 9b apresenta um corpo de prova após a preparação.

A seguir, a célula triaxial era preenchida com água destilada e iniciava-se o processo de saturação do corpo de prova. Esta etapa tinha a finalidade de permitir o controle das variações de volume do solo durante o ensaio. Na saturação, foi utilizada uma contrapressão de 600kPa, com uma



Fig. 9 – Preparação do corpo de prova para ensaios triaxiais em solo reforçado.

pressão confinante de 620kPa, ambas mantidas por 24h. Ao final, a saturação do corpo de prova era confirmada pela medição do parâmetro B de Skempton igual ou superior a 0,99.

O programa experimental constou de ensaios triaxiais drenados (tipo CD). A velocidade de cisalhamento adotada foi estimada a partir dos dados obtidos durante a fase de adensamento isotrópico do corpo de prova.

2.6 – Ensaios executados

O programa experimental está apresentado no Quadro 3. O objetivo destes ensaios foi avaliar o ganho de resistência e rigidez do conjunto solo-geogrelha com a introdução das camadas horizontais de reforço.

Quadro 3 – Programa de ensaios triaxiais.

Solo	Nº de Camadas de Reforço	Tensão Confinante (kPa)	
Areia	0, 1, 2 ou 4	50, 150 ou 300	
Silte Argiloso	0, 1 ou 4	50, 150 ou 300	

3 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

3.1 – Ensaios em corpos de prova não reforçados

As Figuras 10 e 11 apresentam, respectivamente, os resultados dos ensaios executados com corpos de prova não reforçados de areia e silte argiloso. Observa-se, em ambos os casos, um acréscimo de resistência e de rigidez à medida que o confinamento aumenta.

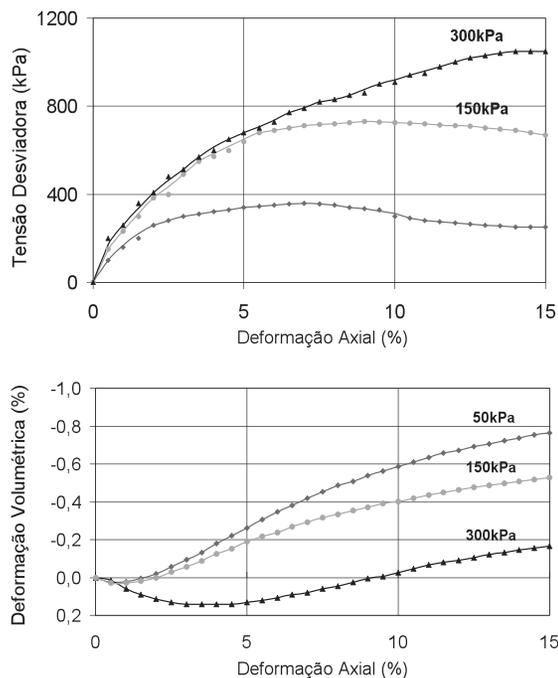


Fig. 10 – Ensaios triaxiais: areia não reforçada.

Nos ensaios em areia (Fig. 10), observa-se que os corpos de prova apresentam, inicialmente, uma redução de volume. No entanto, ainda antes de ser atingida a resistência de pico, o volume do corpo de prova começa a aumentar, apresentando, na ruptura, um volume superior ao do início do cisalhamento.

Nota-se que, com o aumento da tensão confinante, obteve-se uma maior compressão inicial do corpo de prova e uma menor expansão no final do cisalhamento. Este comportamento é considerado característico de areias densas em ensaios triaxiais.

Nos ensaios em silte argiloso (Fig. 11), os corpos de prova sofreram apenas compressão durante o cisalhamento. Com o aumento da tensão confinante, foi maior o decréscimo de volume sofrido pelo corpo de prova durante o cisalhamento por carregamento axial.

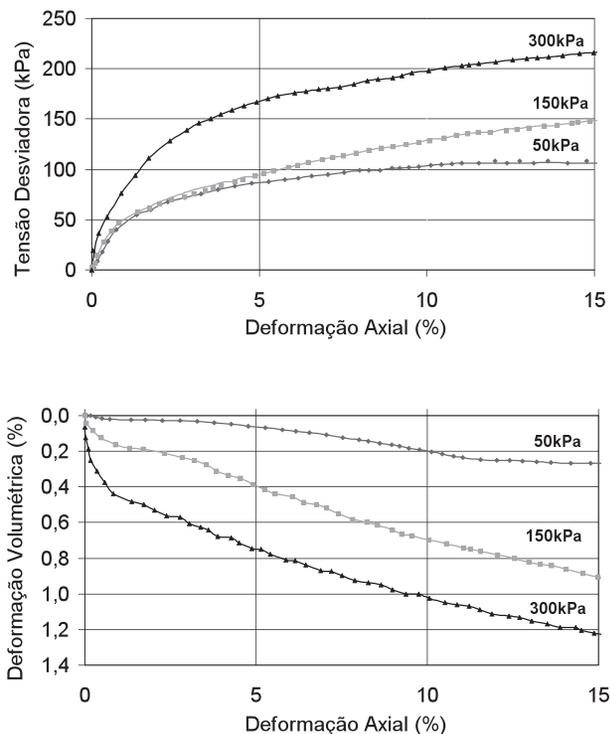


Fig. 11 – Ensaios triaxiais: silte argiloso não reforçado.

3.2 – Ensaios em corpos de prova reforçados

Os resultados dos ensaios triaxiais executados em corpos de prova de areia reforçada estão apresentados nas Figuras 12 a 14. Em todos os ensaios, observa-se um acréscimo de resistência com o aumento da tensão confinante, independente do número de camadas de reforço.

Inicialmente, os corpos de prova sofrem compressão, mas expandem antes de ser atingida a resistência máxima. A redução inicial de volume dos corpos de prova é mais acentuada para maiores valores de tensão confinante. Em contrapartida, a expansão final do corpo de prova diminui com o aumento do confinamento.

Nota-se que a introdução de camadas de reforço restringe também a expansão dos corpos de prova. Nos ensaios sob um confinamento de 150kPa, o corpo de prova com 1 camada de geogrelha (Fig. 12) aumenta de volume durante o cisalhamento. O mesmo acontece com o corpo de prova de

areia não reforçada (Fig. 10). No entanto, nos ensaios com 2 e 4 camadas de geogrelha (Fig. 13 e Fig. 14), verificou-se apenas uma redução de volume do solo reforçado.

A compressão dos corpos de prova aumenta com o número de camadas de reforço, sugerindo que a introdução de elementos de reforço em uma massa de solo provoca um efeito similar ao do aumento do confinamento. Observações similares foram reportadas por Broms (1977) e Saez (1997).

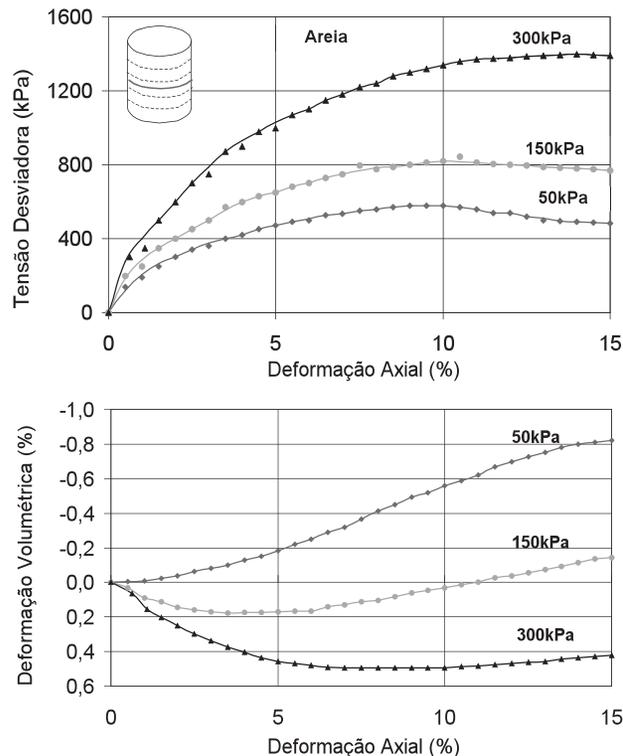


Fig. 12 – Ensaios triaxiais: areia com 1 camada de geogrelha.

Na Fig. 14, observa-se que para um nível de confinamento de 300kPa, o corpo de prova ganha resistência mesmo após atingir uma deformação axial de 15%. Neste ensaio, não se observou um patamar de resistência máxima.

É interessante observar que a deformação axial na ruptura aumenta com a introdução de camadas de reforço e com o aumento da tensão confinante. Esta observação fica evidenciada a partir do gráfico apresentado na Fig. 15.

A Fig. 16 ilustra o corpo de prova reforçado com 4 camadas ao término dos ensaios, sob um confinamento de 150kPa. Nesta Figura, estão indicadas as posições das camadas de geogrelha, que podem ser facilmente notadas ao término dos ensaios.

Os ensaios executados em corpos de prova de silte reforçado estão apresentados nas Figuras 17 e 18. O ganho de resistência e rigidez é mais uma vez constatado à medida que aumentam o confinamento e o número de camadas de reforço.

Nota-se que os corpos de prova sofrem apenas deformações volumétricas compressivas. Quanto maior o número de camadas horizontais de geogrelha, maior a compressão do corpo de prova durante o cisalhamento. A mesma tendência de comportamento foi observada nos ensaios com solo arenoso.

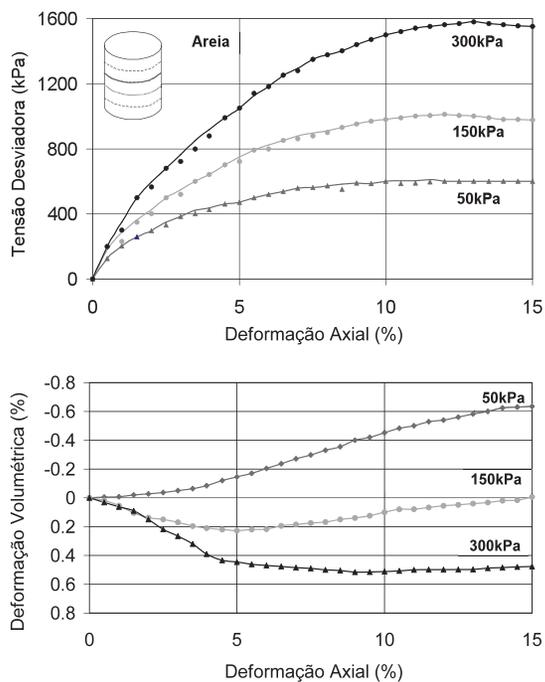


Fig. 13 – Ensaios triaxiais: areia com 2 camadas de geogrelha.

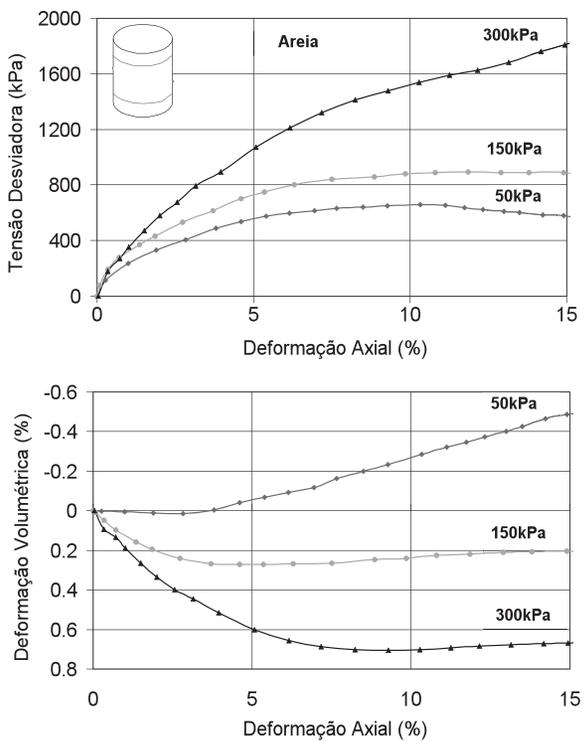


Fig. 14 – Ensaios triaxiais: areia com 4 camadas de geogrelha.

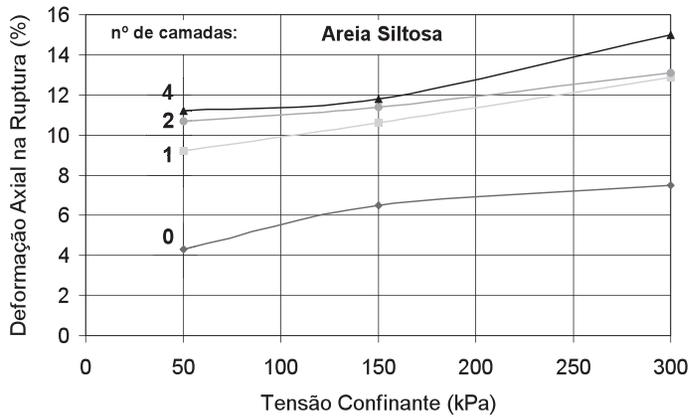


Fig. 15 – Deformação axial na ruptura: ensaios triaxiais em areia.

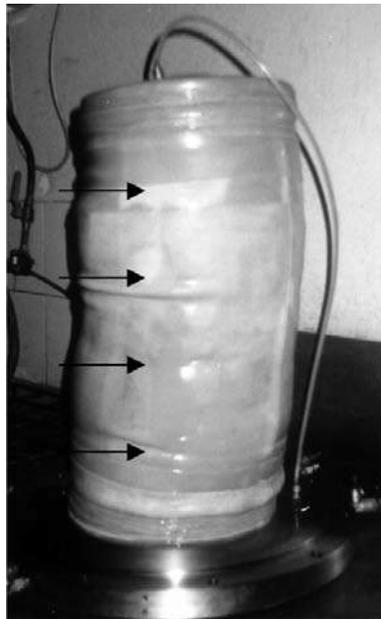


Fig. 16 – Corpo de prova com 4 camadas de geogrelha ao final dos ensaios.

Nos ensaios em silte argiloso reforçado com 1 camada de geogrelha (Fig. 17), observa-se que a tensão desviadora cresce continuamente até se estabilizar em um valor correspondente à resistência máxima. No entanto, no mesmo solo reforçado com 4 camadas de geogrelha (Fig. 18), não se observa um patamar de resistência máxima e a tensão desviadora aumenta, mesmo quando o corpo de prova atinge uma deformação axial de 15%, para os três níveis de tensão confinante.

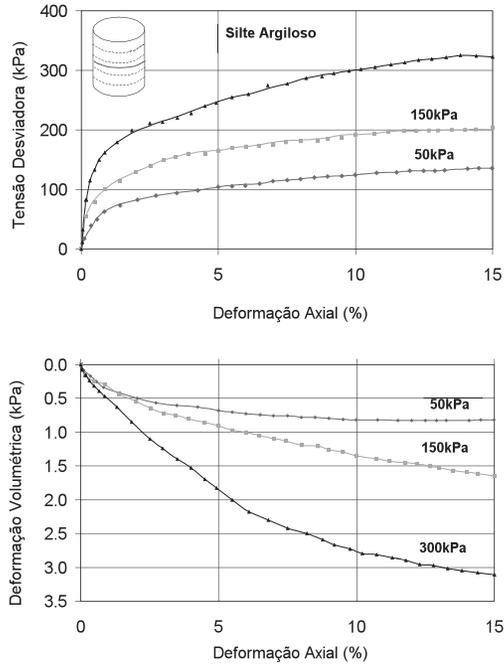


Fig. 17 – Ensaio triaxiais: silte argiloso com 1 camada de geogrelha.

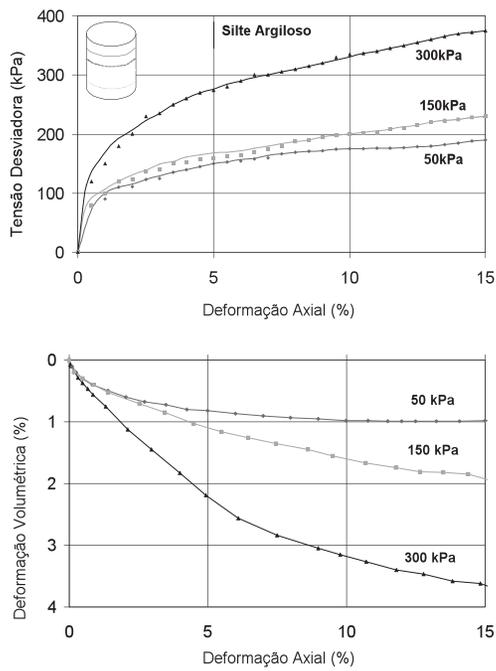


Fig. 18 – Ensaio triaxiais: silte argiloso com 4 camadas de geogrelha.

4 – INFLUÊNCIA DAS CAMADAS DE REFORÇO

A Fig. 19 mostra uma comparação entre os ensaios executados em areia não reforçada e os ensaios com areia reforçada, para os 3 níveis distintos de confinamento. Observa-se um ganho significativo de resistência com a introdução de camadas de geogrelha. Nos ensaios com $\sigma_c = 50\text{kPa}$ (Fig. 19a), o ganho de resistência com a introdução de apenas 1 camada é de 61%. Com o aumento do número de camadas, a resistência não aumenta mais de forma significativa, para este nível de confinamento.

No entanto, sob um maior nível de confinamento, de 300kPa, observa-se que a introdução de 4 camadas de geogrelha produz um ganho de resistência de 72% em relação à amostra não reforçada (Fig. 19c).

É interessante observar a proximidade das curvas tensão vs. deformação dos corpos de prova com 2 e 4 camadas, sob tensões confinantes de 150 e 300kPa. Os resultados sugerem que as camadas de reforço localizadas próximo às extremidades dos corpos de prova não exercem influência significativa na resistência do conjunto, uma vez que estão localizadas em uma região pouco solicitada durante o cisalhamento. Comportamento similar foi observado por Broms (1977), a partir de ensaios triaxiais em corpos de prova de areia densa reforçada.

Nos ensaios com 4 camadas, nota-se que o corpo de prova ganha resistência, mesmo após deformações axiais da magnitude de 15%. Este ganho de resistência aumenta com o aumento da tensão confinante.

A Fig. 20 apresenta uma comparação entre os ensaios executados em silte reforçado e não reforçado, para os 3 níveis de confinamento. De maneira similar aos ensaios em areia, nota-se que a resistência e a rigidez do corpo de prova aumentam com o número de camadas de geogrelha. Para um nível de confinamento de 50kPa, verifica-se um ganho de resistência de 26% quando se introduz 1 camada de geogrelha, e de 75% quando são inseridas 4 camadas. Para um confinamento de 300kPa, o ganho de resistência é de 52% e 76%, com a introdução de 1 e 4 camadas de geogrelha, respectivamente.

Quanto às características de deformabilidade do conjunto, observa-se um aumento de rigidez com a inserção de camadas de geogrelha. A Fig. 21 ilustra a variação da razão E_{50}/σ_3 com o número de camadas de geogrelha. O módulo de deformabilidade E_{50} é obtido a partir da curva tensão desviadora vs deformação axial, sendo calculado para um valor correspondente a 50% da tensão desviadora máxima.

Pode-se observar uma tendência de aumento da razão E_{50}/σ_3 com o número de camadas. Nos ensaios com solo arenoso, existe uma faixa aproximadamente linear de aumento da razão E_{50}/σ_3 . Esta faixa é obtida em função dos diferentes níveis de confinamento. Nos ensaios com silte argiloso, o comportamento linear não é observado.

A introdução de elementos de reforço exerce uma influência similar a um aumento de confinamento. O aumento da tensão lateral faz com que seja necessária uma tensão axial mais elevada para conduzir à ruptura do corpo de prova por cisalhamento. A Fig. 2 apresentou o comportamento típico de um solo reforçado em ensaios triaxiais de compressão. Para um mesmo estado de tensões externo, há um incremento da resistência ao cisalhamento. O círculo de Mohr desloca-se para a direita devido ao aumento de σ_3 . Este aumento, segundo Saez (1997), pode estar relacionado ao desenvolvimento de esforços de tração durante o ensaio, ou à mobilização da resistência na interface solo-reforço (respectivamente, mecanismos 1 e 2 na Fig. 5). O valor da tensão principal menor no instante da ruptura dependerá do tipo de mecanismo mobilizado, e pode ser estimado pelas expressões (1) e (2), anteriormente apresentadas.

Uma vez finalizados os ensaios, procedeu-se à desmontagem cuidadosa dos corpos de prova e à inspeção visual das amostras de geogrelha. As geogrelhas utilizadas nos corpos de prova arenosos apresentavam distorções, sugerindo que solicitações de tração ocorreram durante o cisalhamento (mecanismo 1). Neste caso, o aumento de σ_3 é provocado pelo esforço de tração na geogrelha.

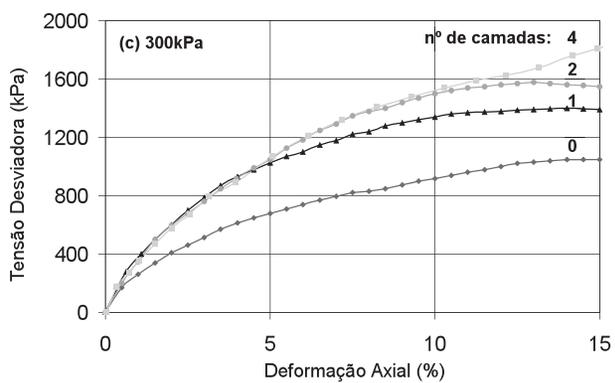
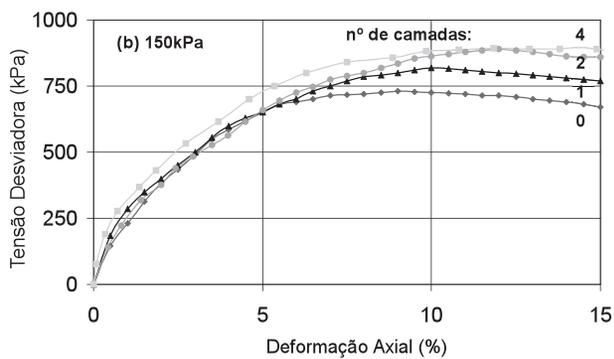
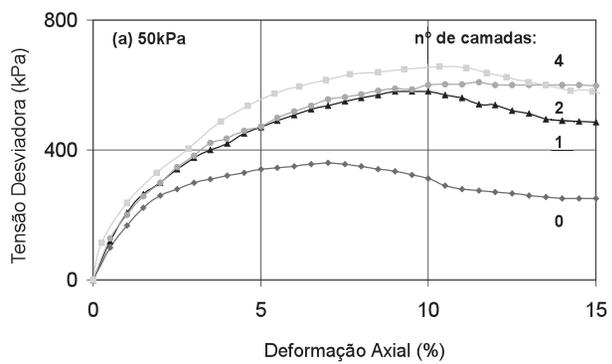


Fig. 19 – Ensaios triaxiais em areia reforçada e não reforçada (Sicira *et al*, 2005).

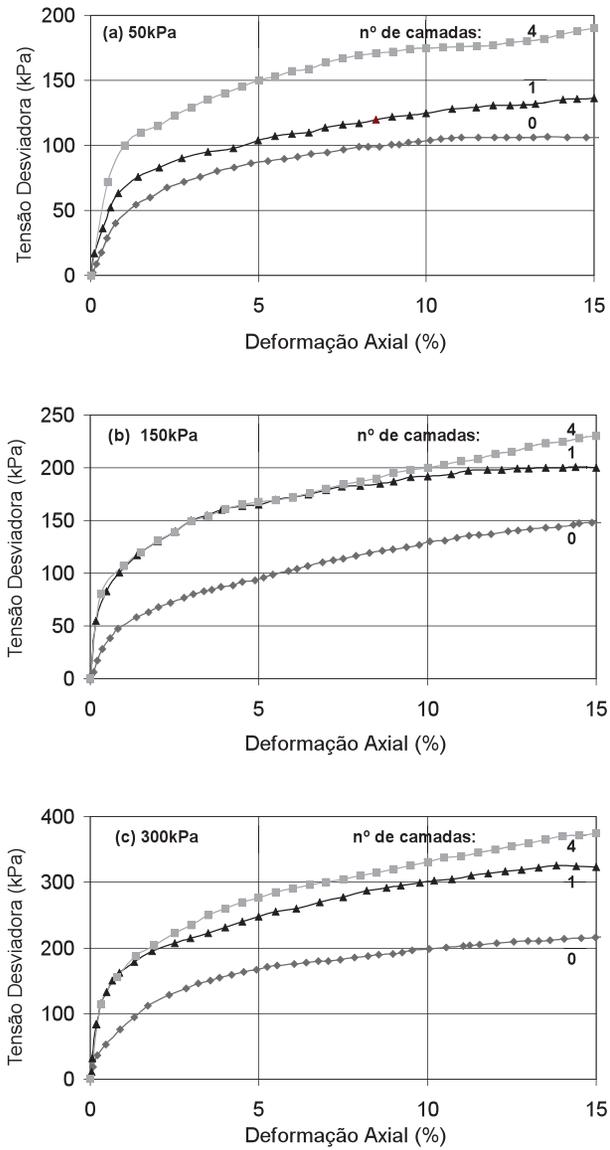


Fig. 20 – Ensaios triaxiais em silte argiloso reforçado e não reforçado.

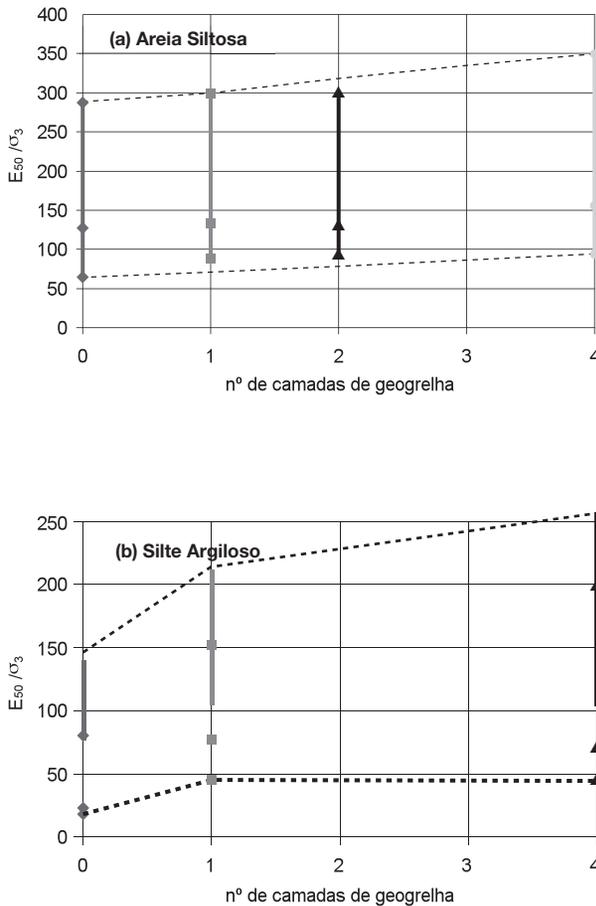


Fig. 21 – Valores de E_{50}/σ_3 de solo reforçado, obtidos em ensaios triaxiais.

No entanto, após os ensaios com solo silto-argiloso, não se observou qualquer distorção ou dano, sugerindo que a geogrelha deslizava em relação ao solo envolvente, e que o aumento de σ_3 era causado pela resistência ao cisalhamento mobilizada na interface solo-geogrelha (mecanismo 2).

As envoltórias de resistência do solo arenoso, expressas no diagrama $p \times q$, estão apresentadas na Fig. 22. Nota-se que as envoltórias são aproximadamente paralelas, indicando um aumento no intercepto coesivo.

De acordo com a constatação de que as geogrelhas foram solicitadas à tração nos ensaios em solo arenoso, optou-se por considerar a hipótese de um aumento no valor de σ_3 ao final do ensaio, equivalente ao esforço de tração atuante na geogrelha. A Fig. 23 apresenta a envoltória da areia não reforçada, a envoltória da areia com 1 camada de geogrelha e a envoltória que considera o aumento de σ_3 , decorrente do esforço de tração atuante na geogrelha. Foram atribuídos diferentes valores para σ_G , buscando a adequação dos novos estados de tensão (obtidos a partir de σ_{3f}) à envoltória do solo não reforçado. O Quadro 4 apresenta os valores da tensão de tração na geogrelha (σ_G), calculados para os 3 níveis distintos de confinamento. Observa-se que a tração na geogrelha (σ_G) aumentou com a tensão confinante, ou seja, para maiores níveis de confinamento, ocorreu uma maior solicitação do reforço, e um maior ganho de resistência em relação ao solo não reforçado. Ressalta-se que este mecanismo apresenta como limite superior o valor de resistência à tração da geogrelha utilizada como reforço.

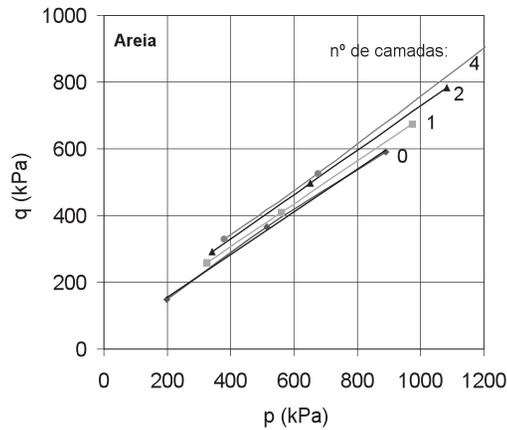


Fig. 22 – Envoltórias de resistência: ensaios triaxiais em areia.

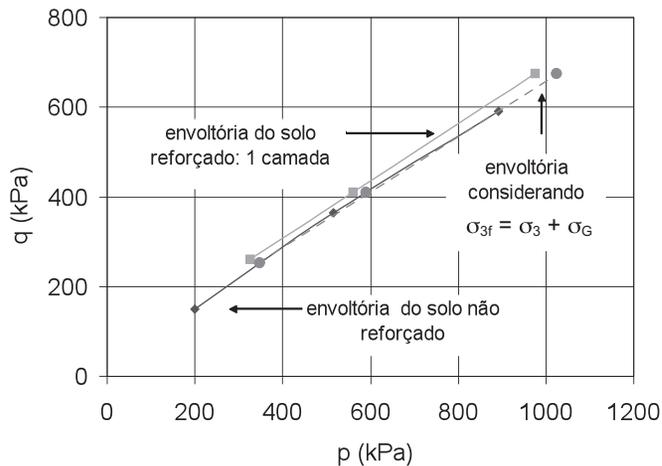


Fig. 23 – Aumento de σ_3 : ensaios triaxiais em areia.

Nos ensaios com solo silto-argiloso, observou-se a ocorrência de deslocamento relativo entre o solo e o elemento de reforço. Neste caso, considerou-se a hipótese de um aumento no valor de σ_3 ao final do ensaio, decorrente da resistência mobilizada na interface solo-geogrelha. A Fig. 24 apresenta as envoltórias do silte argiloso não reforçado, do silte argiloso com 1 camada de geogrelha e a envoltória que considera o aumento de σ_3 nos ensaios com solo reforçado. Os valores de τ_{SG} foram obtidos a partir de ensaios de cisalhamento direto com reforço horizontal, reportados por Sieira e Sayão (2005), com o mesmo solo silto-argiloso e a mesma geogrelha MG. Segundo os autores, a resistência na interface silte argiloso/geogrelha pode ser obtida para qualquer nível de tensão confinante vertical, a partir da expressão:

$$\tau_{SG} = 37 + \sigma \cdot \tan 21^\circ \quad (3)$$

onde: $c_a = 37\text{kPa}$ (adesão na interface solo-geogrelha), e $\delta = 21^\circ$ (ângulo de atrito na interface).

Quadro 4 – Valores de σ_G : ensaios triaxiais em areia.

σ_3 (kPa)	σ_G (kN/m)	σ_{3f} (kPa)
50	20	70
150	30	180
300	50	350

Neste caso, foram consideradas diferentes porcentagens de mobilização de τ_{SG} , buscando a adequação dos novos estados de tensão (obtidos a partir de σ_{3f}) à envoltória do solo não reforçado. A Fig. 24 mostra um ajuste adequado quando se considerou um aumento de σ_3 devido à mobilização de 80% da resistência ao cisalhamento na interface. Os resultados sugerem, portanto, que a resistência na interface não é totalmente mobilizada durante o cisalhamento dos corpos de prova.

Cabe ressaltar que no caso particular do solo silto-argiloso (Fig. 25), as envoltórias do solo reforçado e não reforçado não são paralelas. Isto dificulta um bom ajuste dos novos estados de tensão à envoltória do solo não reforçado. Para níveis reduzidos de confinamento (50kPa), houve um ganho de resistência de 67% do corpo de prova reforçado com 4 camadas, em relação ao corpo de prova não reforçado. Nos ensaios com tensões confinantes mais elevadas (300kPa), o ganho de resistência foi de 72%.

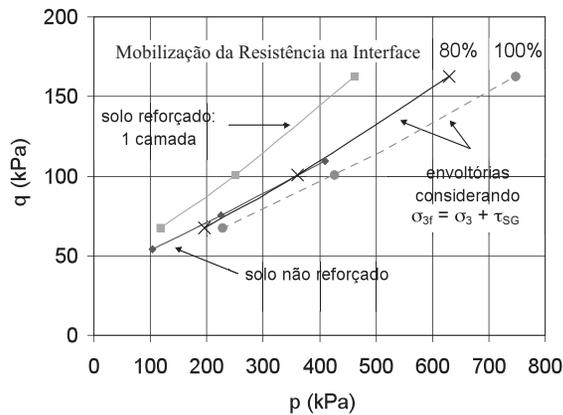


Fig. 24 – Aumento de σ_3 : ensaios triaxiais em silte argiloso.

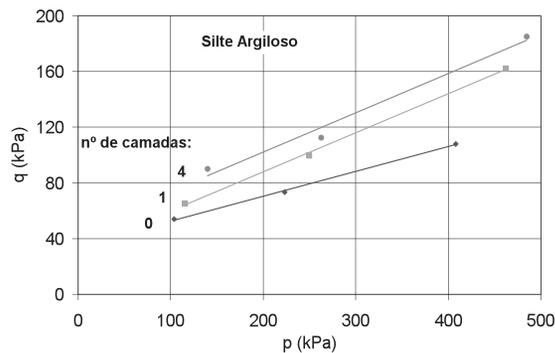


Fig. 25 – Envoltórias de resistência: ensaios triaxiais em silte argiloso.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foram apresentados e discutidos os resultados dos ensaios triaxiais executados com corpos de prova de areia e silte argiloso, reforçados com camadas de geogrelha. Foram executados ensaios em equipamentos de grandes dimensões (9” de diâmetro), em solos com diversas camadas de geogrelhas sob tensões confinantes entre 50 e 300kPa. O objetivo principal destes ensaios foi avaliar o ganho de resistência e a rigidez do conjunto solo-geogrelha com a adição de camadas horizontais de reforço.

Em todos os ensaios, observou-se um acréscimo de resistência e de rigidez com o aumento do número de camadas de reforço, independente da tensão confinante.

A compressão dos corpos de prova aumentou com o número de camadas de reforço, sugerindo que a introdução de elementos de reforço em uma massa de solo provoca um efeito similar ao do aumento do confinamento. O aumento da tensão lateral faz com que seja necessária uma tensão axial mais elevada para causar a ruptura do corpo de prova por cisalhamento.

Observou-se, ainda, que a deformação axial na ruptura aumentou com a introdução de camadas de reforço e com o aumento da tensão confinante.

Os resultados dos ensaios em solo reforçado mostraram que as camadas de reforço localizadas próximas às extremidades dos corpos de prova não exercem influência significativa na resistência do conjunto, uma vez que estão localizadas em uma região pouco solicitada durante o cisalhamento.

Os diferentes mecanismos que podem ocorrer durante os ensaios triaxiais em solo reforçado foram discutidos, com base na observação do estado das geogrelhas ao término dos ensaios. Em solo arenoso reforçado, as geogrelhas apresentavam distorções, sugerindo a ocorrência de solicitações de tração durante o cisalhamento. No campo, este mecanismo corresponde ao arrancamento da geogrelha da massa de solo, e ocorre quando a superfície potencial de ruptura intercepta o reforço segundo uma determinada inclinação.

Nos ensaios com solo silto-argiloso reforçado, a geogrelha deslizava em relação ao solo envolvente, sem exibir qualquer distorção ou dano. No campo, este mecanismo corresponde ao cisalhamento direto na interface solo-geogrelha e ocorre quando a superfície potencial de ruptura tangencia a camada de reforço. No entanto, além das diferenças nos movimentos relativos na interface, é importante observar também a relação espessura da geogrelha/dimensão das partículas de solo. Solos finos, mesmo em ensaios de arranque, mobilizam uma menor parcela de resistência passiva nas barras transversais das geogrelhas, por isso induzem uma menor distorção ao geossintético. Por outro lado, em ensaios de corte direto, os solos granulares induzem distorções nas geogrelhas.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Laboratório de Geotecnia do Cedex (Espanha) e da empresa Maccaferri do Brasil. O auxílio recebido do CNPq (Brasil) também foi importante para o desenvolvimento da pesquisa sobre solos reforçados.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM D-5321 (1992) – *Standard test method for determining the coefficient of soil and geosynthetic or geosynthetic and geosynthetic friction by the direct shear method*. Annual Book of ASTM Standards, USA.

Brooms B. B. (1977) – *Triaxial tests with fabric-reinforced soil*. International Conference on Soil Textile, Paris, v. 1, pp. 129-133.

- Gray, D. H.; Ohashi, H. (1983) – *Mechanics of fiber reinforcement in sand*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, v. 109 (3), pp. 335–353.
- Michalowski, R. L.; Cermak, J. (2003) – *Triaxial compression of sand reinforced with fibers*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, v. 129 (2), pp. 125–136.
- Park, S. S. (2009) – *Effect of fiber reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fiber-reinforced cemented sand*. Geotextiles and Geomembranes, v.27, pp.162–166.
- Rajagopal, K.; Krishnaswamy, N. R.; Latha, G. M. (1999) – *Behavior of sand confined with single and multiple geocells*. Geotextiles and Geomembranes, v. 17, pp. 171–184.
- Saez, J. A. (1997) – *Caracterización geomecánica de geotextiles*. Curso sobre técnicas generales de refuerzo del terreno y sus aplicaciones. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Espanha, v.1, pp. 1-29.
- Sayão, A. S. F. J.; Nunes, A. LL. S.; Becker, L. B; Sieira, A. C. C. F. (2009) – *Behaviour of geo-grids under pullout tests in fine and coarse soils*. 17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, ISSMGE, Alexandria, Egypt.
- Sieira, A. C. C. F.; Sayão, A. S. F. J. (2002) – *Estudo experimental dos mecanismos de interação solo-geogrelha*. Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa, SPG, v. 8, pp. 1569-1578.
- Sieira, A. C. C. F.; Sayão, A. S. F. J. (2005) – *Simulação de ensaios de cisalhamento direto em solo reforçado com geogrelha*. 5^o Simpósio Brasileiro de Aplicações de Informática em Geotecnia, ABMS, v. 1, pp. 260 – 265.
- Sieira, A. C. C. F.; Sayão, A. S. F. J.; Gerscovich, D. M. S. (2005) – *Modelação de Ensaios Triaxiais em Corpos de Prova Reforçados com Geogrelhas*. 2^{as} Jornadas Luso-Espanholas de Geotecnia, pp. 171-177.
- Sieira, A. C. C. F.; Sayão, A. S. F. J., Gerscovich, D. M. S. (2006) – *Mobilização da resistência ao arranque de geogrelhas*. Revista Geotecnia, SPG, Portugal, v. 108, pp. 99-120.
- Sieira, A. C. C. F., Sayão, A. S. F. J. (2009) – *Experimental investigation of mechanical damage in geogrids*. Soils and Rocks, ABMS/ ABGE/ SPG, Brasil. v. 32, no. 1, pp.19-30.
- Sieira, A. C. C. F.; Gerscovich, D. M. S.; Sayão, A. S. F. J. (2009) – *Displacement and load transfer mechanisms of geogrids under pullout conditions*. Geotextiles and Geomembranes, v. 27, pp. 241-253.
- Wheeler, P. (1996) – *Earth bound: reinforced soil and BS8006*. Ground engineering, reinforcement soil supplement, London, UK, pp. 3-5.
- Zhang, M. X.; Javadib, A. A.; Min, X. (2006) – *Triaxial tests of sand reinforced with 3D inclusions*. Geotextiles and Geomembranes, v. 24, pp. 201–209.