

9 Resultados dos Ensaio Triaxiais

9.1. Introdução

Os ensaios triaxiais executados na presente campanha experimental objetivaram a obtenção dos parâmetros de resistência e deformabilidade de amostras reforçadas com geogrelhas.

O programa experimental constou de 24 ensaios triaxiais consolidados-drenados (CD), com carregamento axial, como apresentado no Capítulo 6. Os ensaios triaxiais foram executados com corpos de prova de areia e silte argiloso reforçados com camadas de geogrelha. Foram executados ensaios com 1, 2 e 4 camadas de geogrelhas sob tensões confinantes de 50, 150 e 300kPa em equipamentos de grandes dimensões (9" de diâmetro).

O objetivo destes ensaios consistiu em avaliar o ganho de resistência e rigidez do conjunto solo-geogrelha com a introdução de camadas horizontais de reforço.

Os ensaios triaxiais foram executados apenas com a geogrelha MacGrid, por ser a única que atende aos requisitos da norma ASTM D5321, ou seja, apenas a geogrelha MacGrid apresenta uma razão S/ϕ (abertura da malha / diâmetro do corpo de prova) inferior a 1/5.

9.2. Ensaio em Corpos de Prova Não Reforçados

A Figura 162 apresenta os resultados dos ensaios executados com corpos de prova de areia não reforçados. Observa-se que a tensão desviadora (Figura 162a) cresce com as deformações axiais, até atingir um valor máximo, que corresponde à resistência de pico. Uma vez atingida a resistência máxima, a tensão desviadora decresce lentamente até se estabilizar em torno de um valor que é definido como a resistência residual.

Em relação às deformações volumétricas (Figura 162b), 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 crescer, apresentando, na ruptura, um volume maior do que no início do cisalhamento.

A resistência e a rigidez do corpo de prova aumentam com o confinamento. Nota-se também que, quanto maior a tensão confinante, maior a compressão inicial do corpo de prova e menor a expansão no final do cisalhamento. Este comportamento é considerado típico de areias densas em ensaios triaxiais.

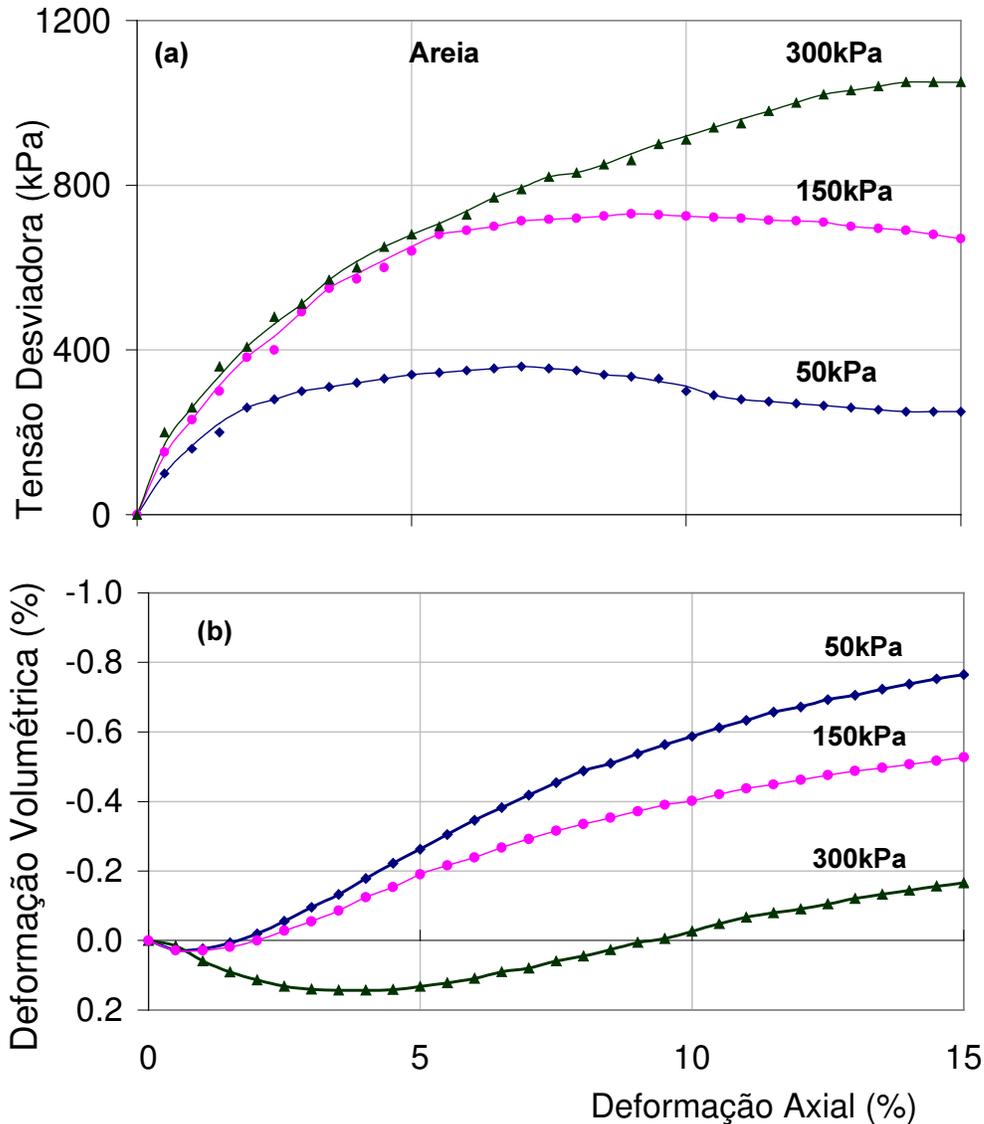


Figura 162 - Ensaios Triaxiais: Areia Não Reforçada

A Figura 163 exhibe os resultados dos ensaios triaxiais executados em corpos de prova de silte não reforçados. Da mesma forma, nota-se um acréscimo

de resistência e rigidez com o aumento do confinamento. No entanto, os corpos de prova sofrem apenas compressão durante o cisalhamento. Quanto maior a tensão confinante, maior o decréscimo de volume sofrido pelo corpo de prova durante o carregamento axial. Este comportamento é típico de argilas normalmente adensadas ou areias fofas.

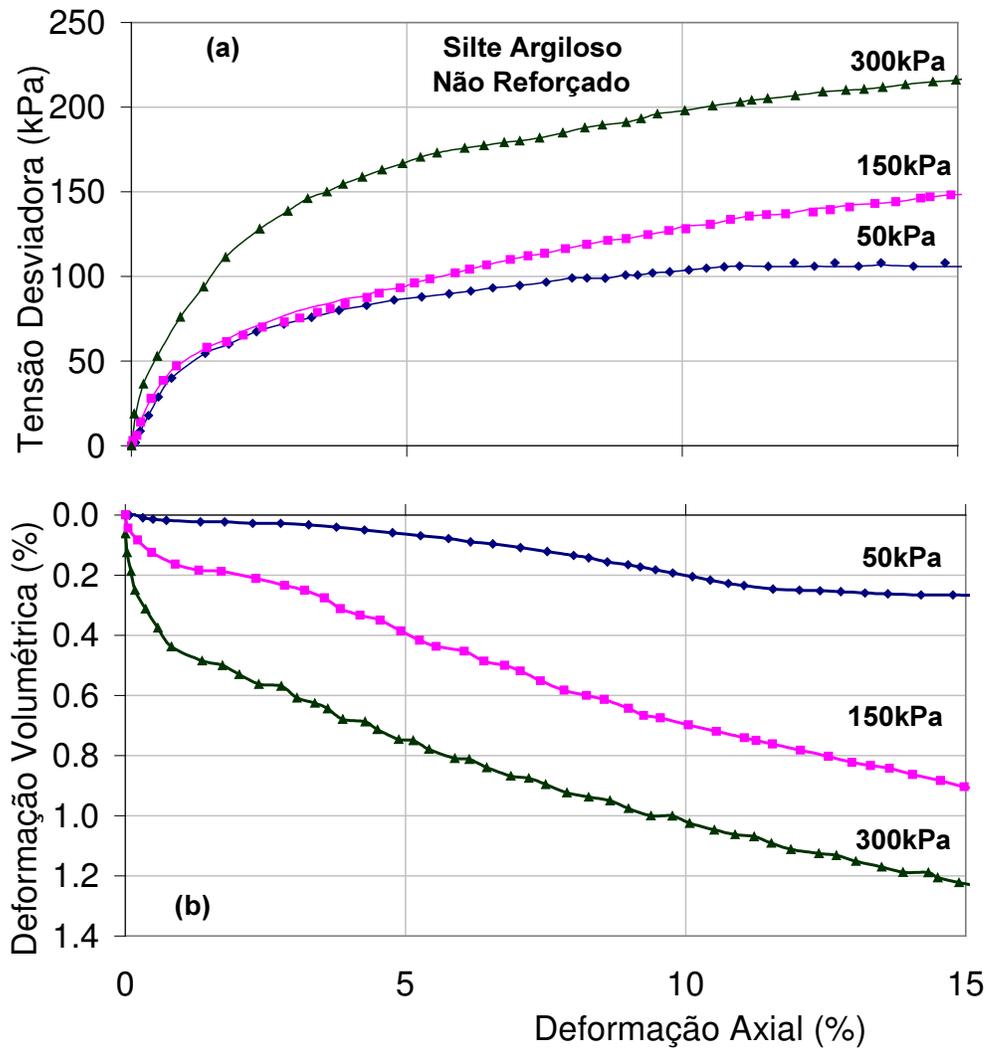


Figura 163 - Ensaios Triaxiais: Silte Argiloso Não Reforçado

9.3. Ensaio em Corpos de Prova de Areia Reforçados

Nas Figuras 164 a 166, estão apresentados os resultados dos ensaios triaxiais executados em corpos de prova de areia reforçados. 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 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 confinamento.

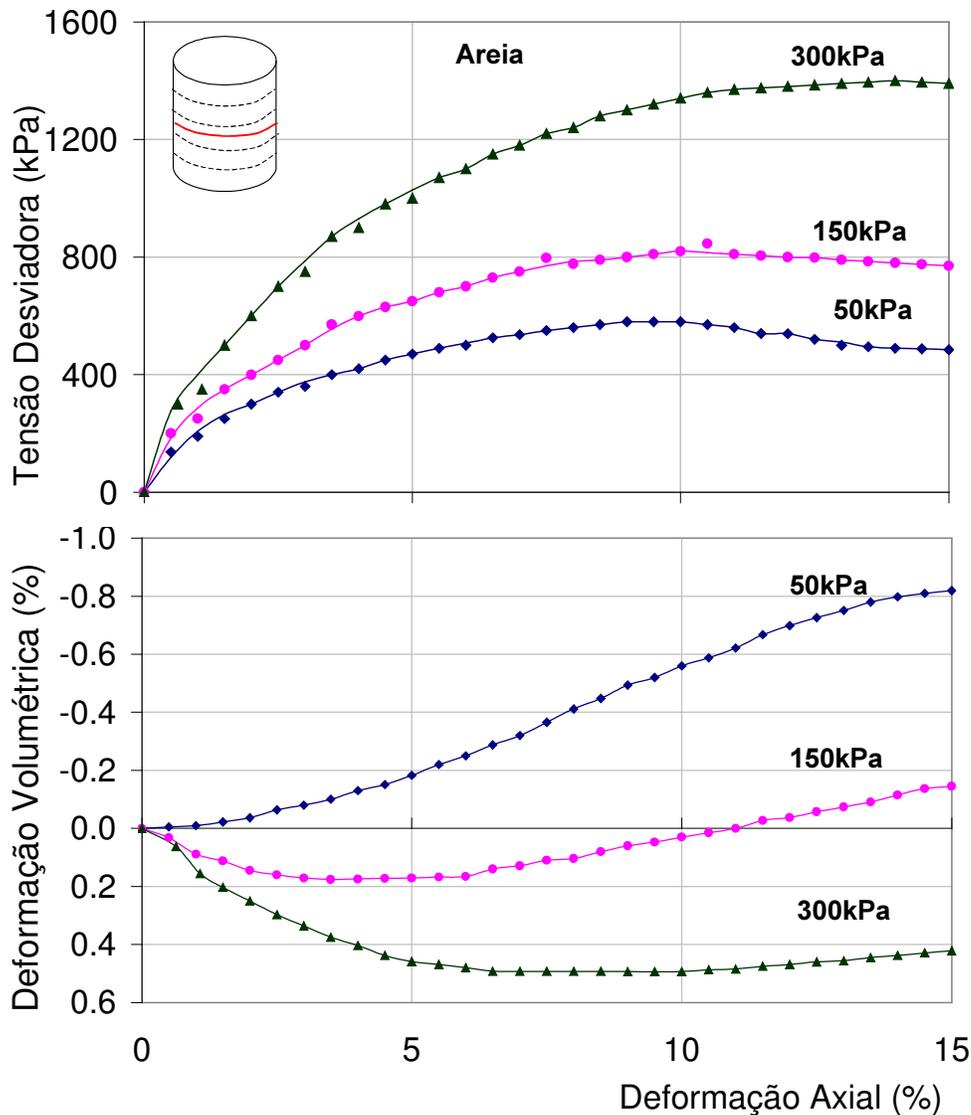


Figura 164 - Ensaio Triaxiais: Areia com 1 Camada de Geogrelha

Nota-se que, a introdução de camadas de reforço também restringe a expansão dos corpos de prova. Nos ensaios sob um confinamento de 150kPa, o corpo de prova com 1 camada de geogrelha (Figura 164a) aumenta de volume durante o cisalhamento. O mesmo acontece com o corpo de prova de areia não reforçado (Figura 162). No entanto, nos ensaios com 2 e 4 camadas de geogrelha (Figuras 165 e 166), verifica-se apenas uma redução de volume.

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.

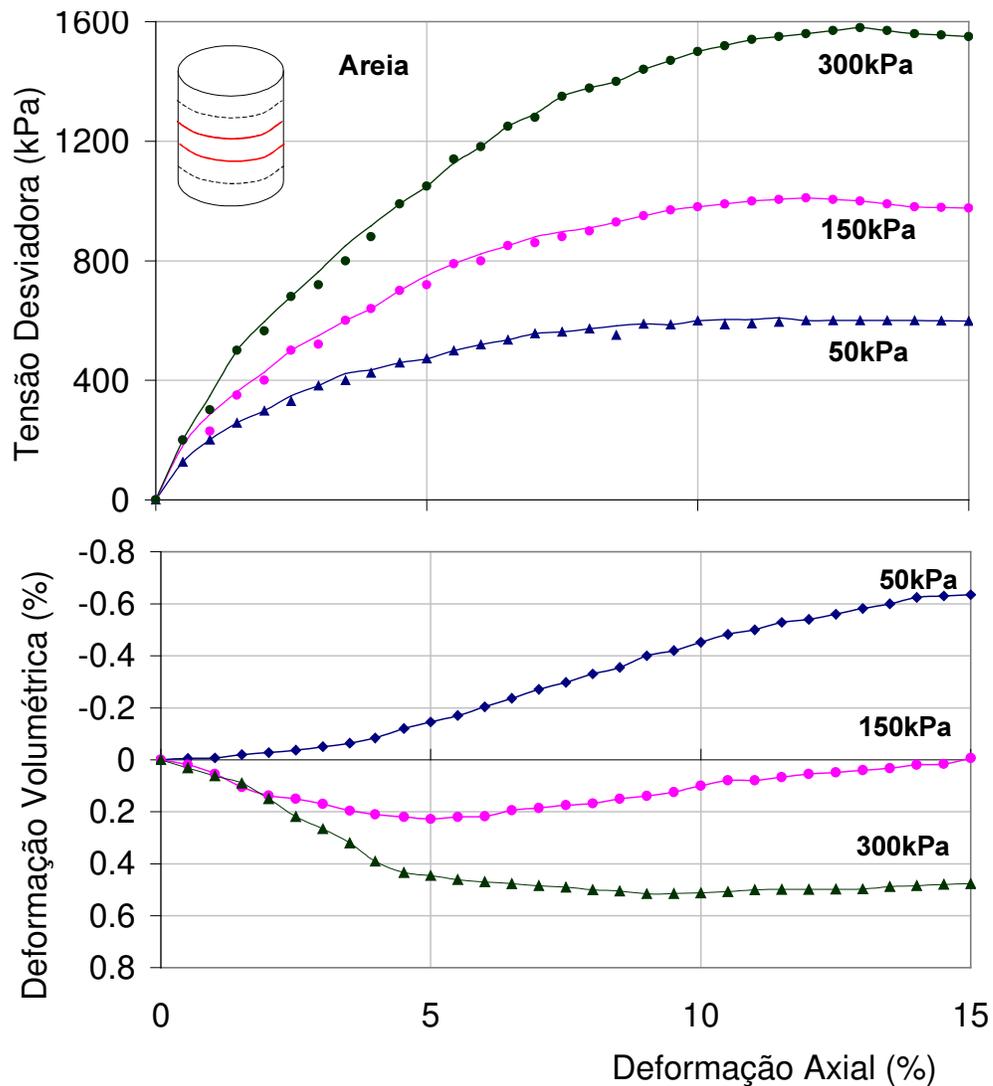


Figura 165 - Ensaios Triaxiais: Areia com 2 Camadas de Geogrelha

Na Figura 166a, observa-se que para um nível de confinamento de 300kPa, o corpo de prova ganha resistência mesmo após atingir 15% de deformação axial. 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 Figura 167.

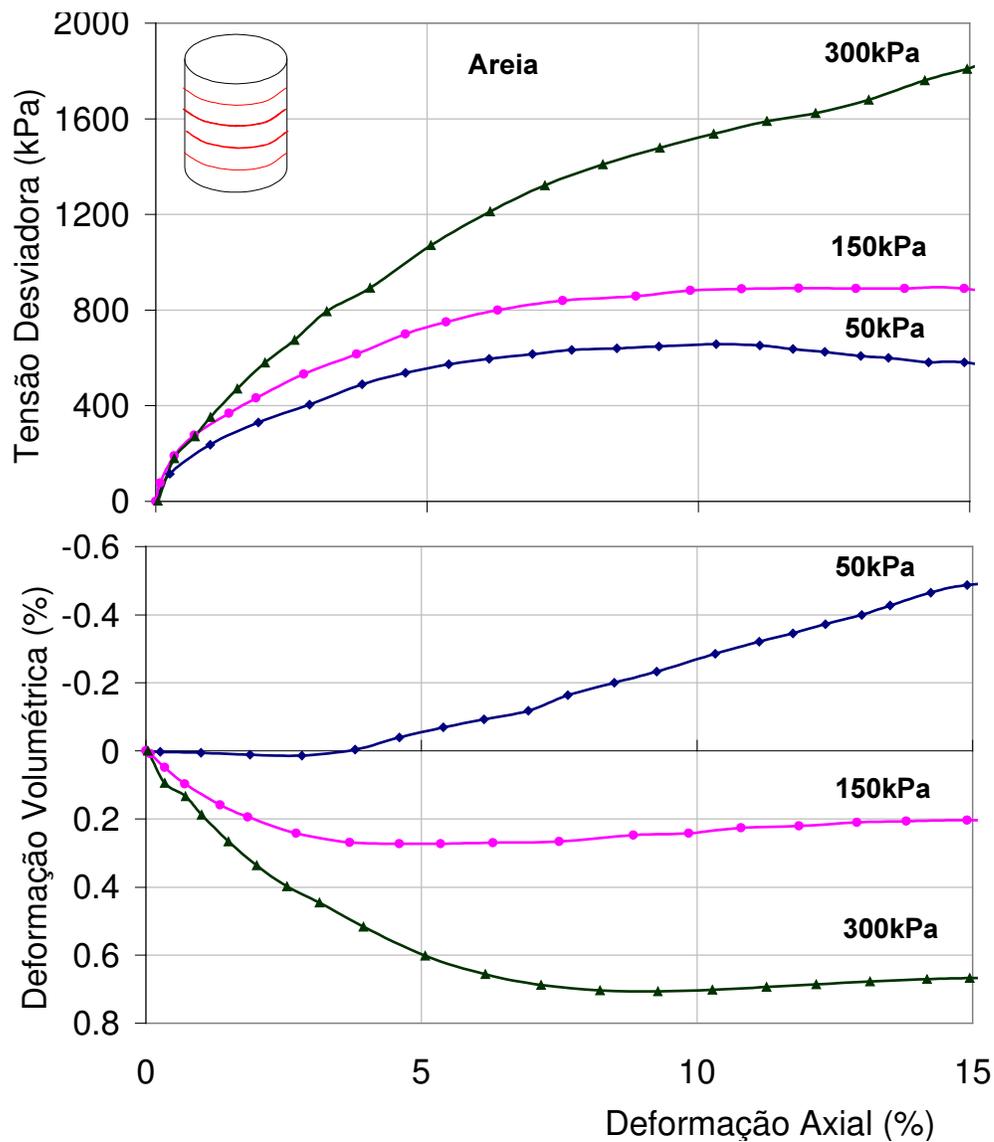


Figura 166 - Ensaios Triaxiais: Areia com 4 Camadas de Geogrelha

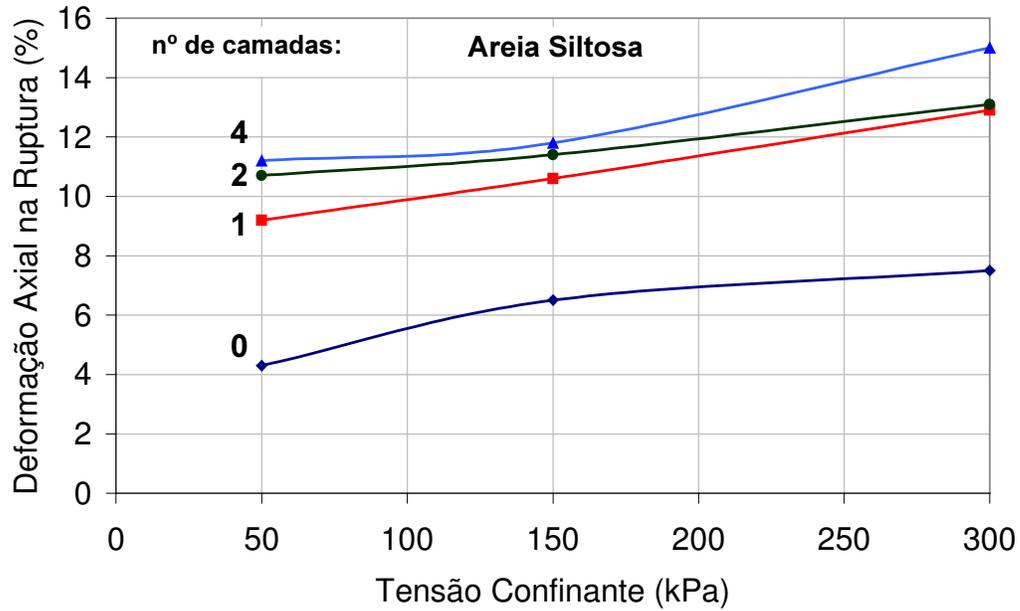


Figura 167 - Deformação Axial na Ruptura: Ensaio Triaxiais em Areia

A Figura 168 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.

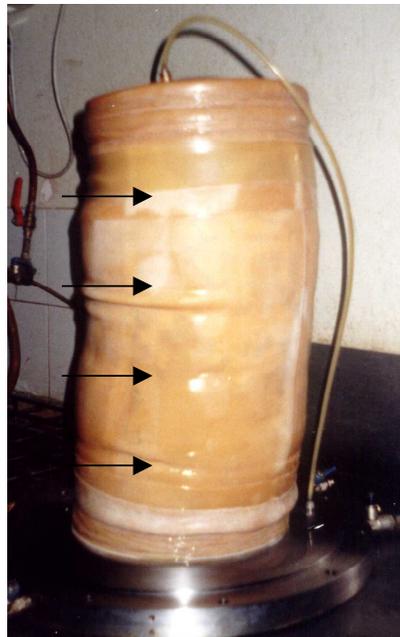


Figura 168 - Corpo de Prova com 4 Camadas de Geogrelha ao Término dos Ensaio.

9.4. Ensaio em Corpos de Prova de Silte Reforçados

Os ensaios executados em corpos de prova de silte reforçados estão apresentados nas Figuras 169 e 170. O ganho de resistência e rigidez é mais uma vez constatado à medida que se aumenta o confinamento e o número de camadas de reforço.

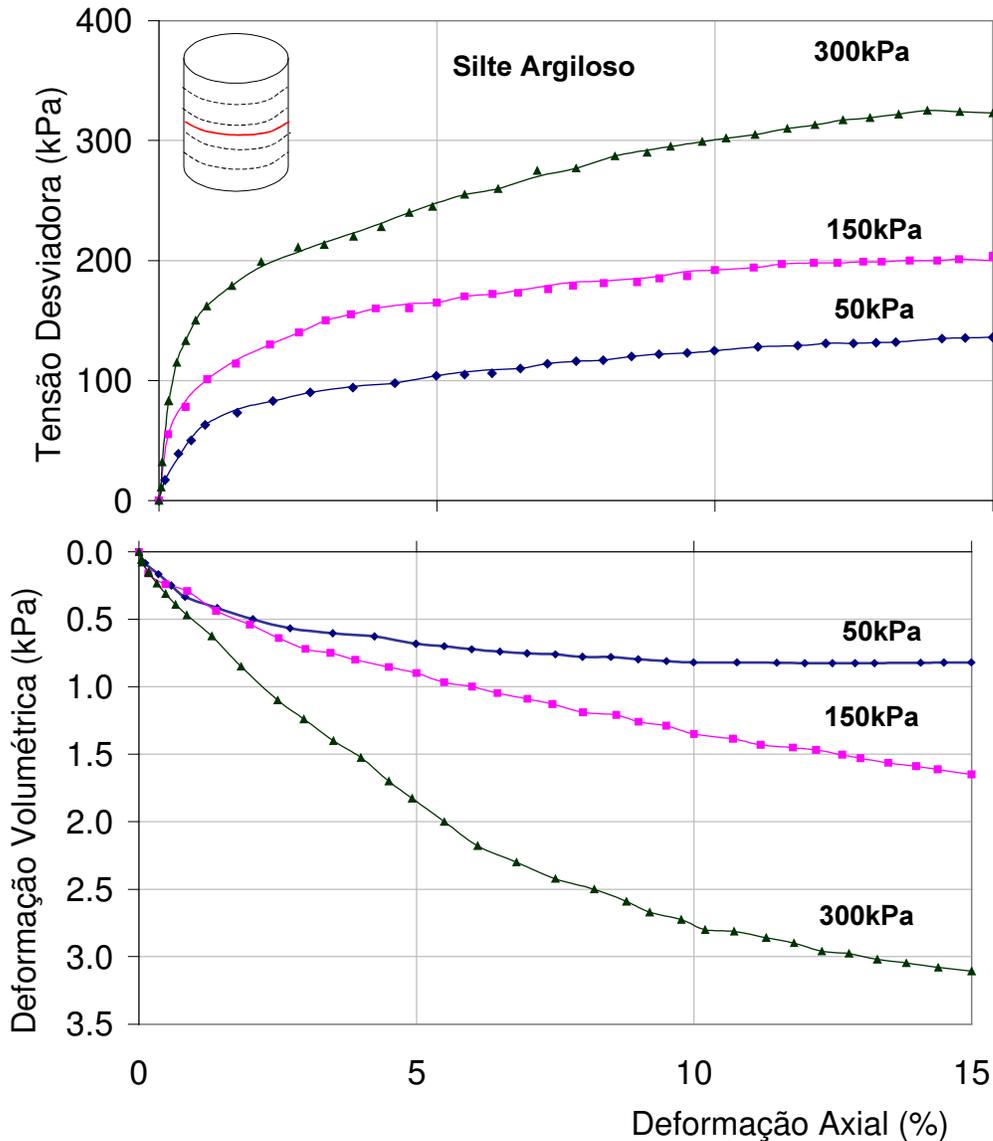


Figura 169 - Ensaio Triaxiais: Silte com 1 Camada de Geogrelha

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.

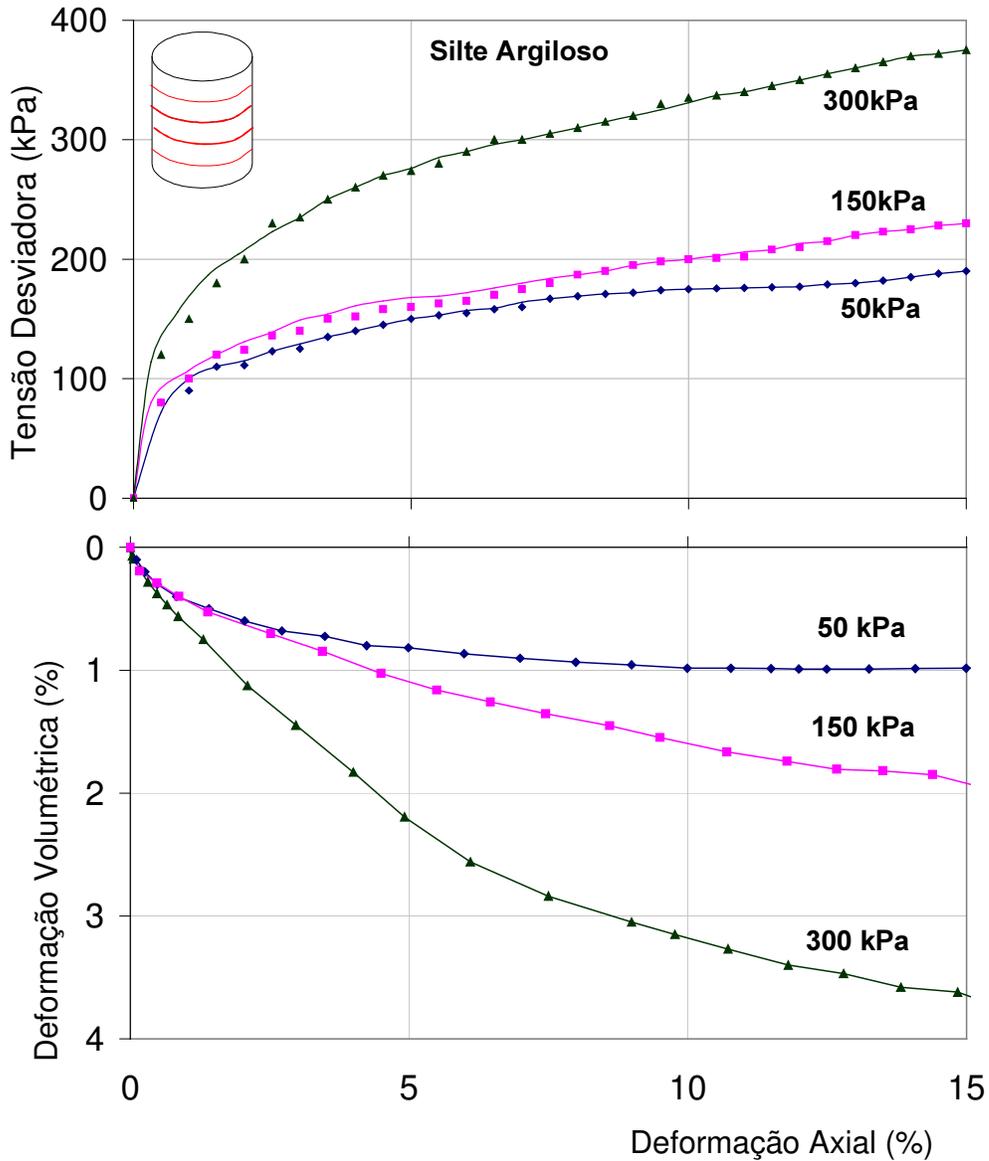


Figura 170 - Ensaios Triaxiais: Silte Argiloso com 4 Camadas de Geogrelha

Nos ensaios reforçados com 1 camada de geogrelha (

Figura 169), observa-se que a tensão desviadora cresce continuamente até se estabilizar em um valor correspondente à resistência máxima. No entanto, nos ensaios reforçados com 4 camadas de geogrelha (Figura 170), 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.

9.5. Influência das Camadas de Reforço

A Figura 171 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 $\sigma_c=50\text{kPa}$ (Figura 171), o ganho de resistência com a introdução de apenas 1 camada é de 61%. Para tensões confinantes mais elevadas, o ganho de resistência não é tão significativo para este nível de confinamento.

No entanto, sob um 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 (Figura 171c).

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 que não é 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 Figura 172 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.

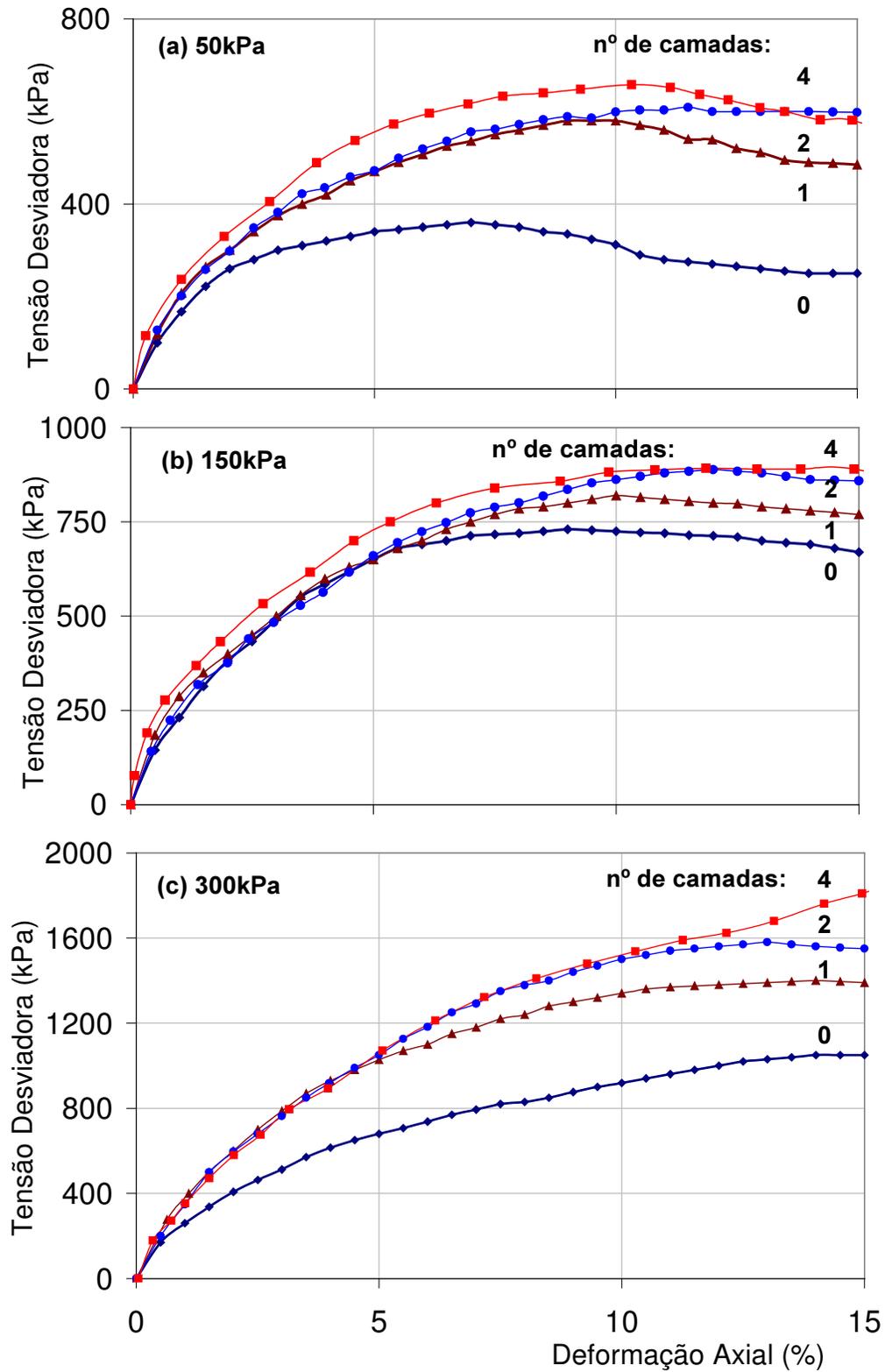


Figura 171 - Ensaio Triaxiais: Areia Não Reforçada x Areia Reforçada

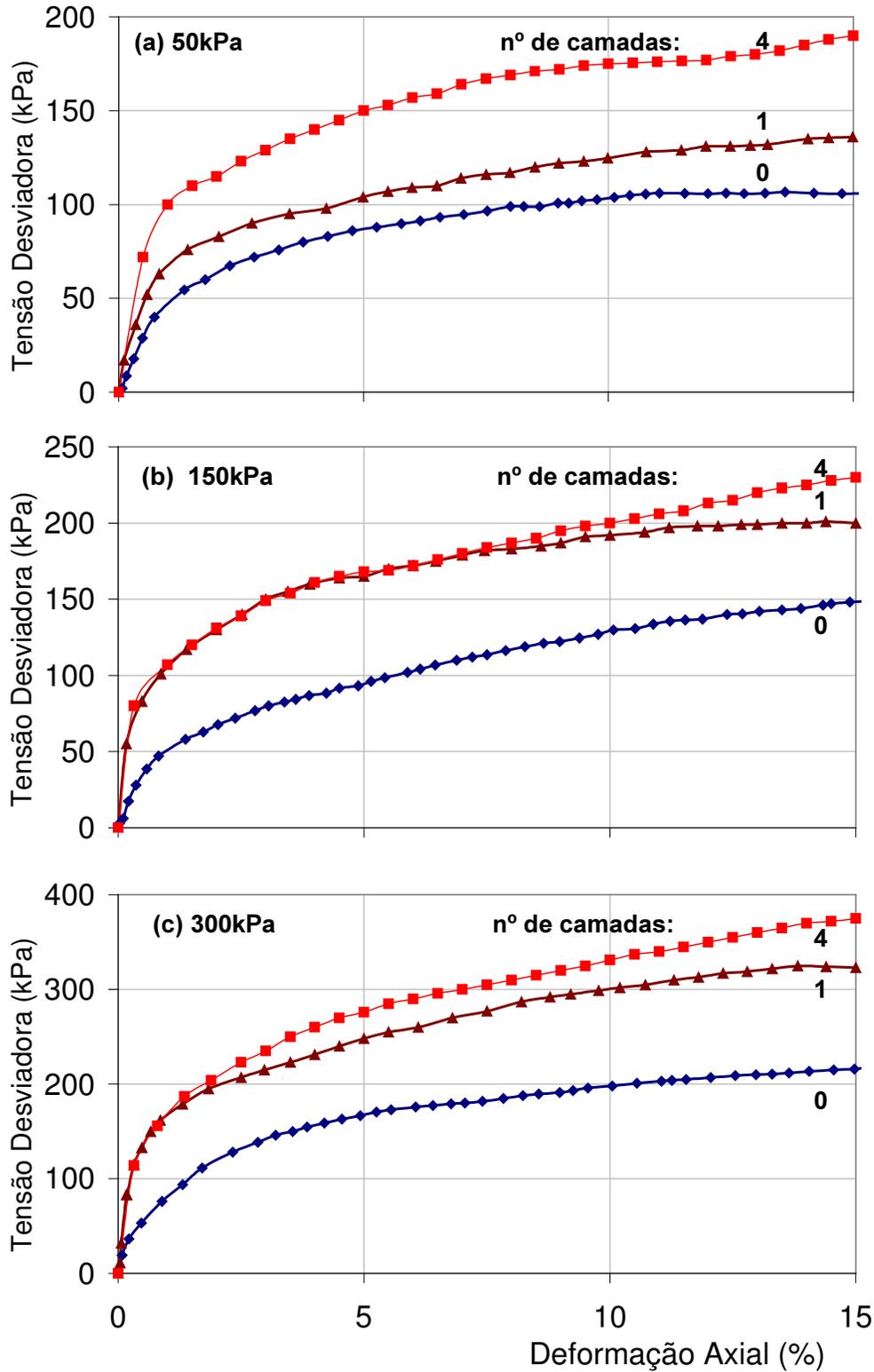


Figura 172 - Ensaios Triaxiais: Silte Não Reforçado x Silte Reforçado

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 à deformabilidade do conjunto, observa-se um aumento de rigidez com a inserção de camadas de geogrelha. A Figura 173 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 e é calculado para um valor correspondente a 50% da tensão desviadora máxima.

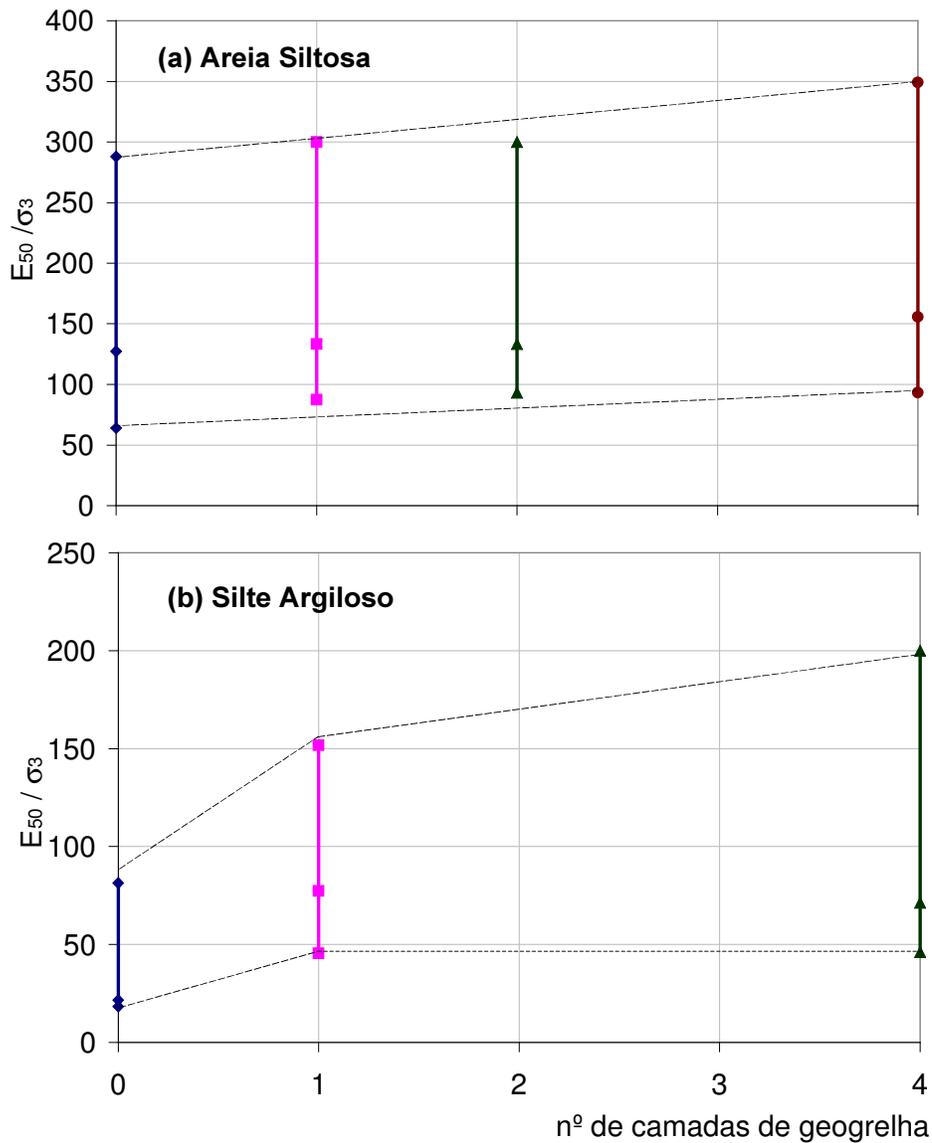


Figura 173 - Valores de E_{50} / σ_3 Obtidos a Partir dos Ensaio Triaxiais

Pode-se observar uma tendência de aumento da razão E_{50}/σ_3 com o número de camadas. Nos ensaios com areia, 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.

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 Figura 174. 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 Figura 174.

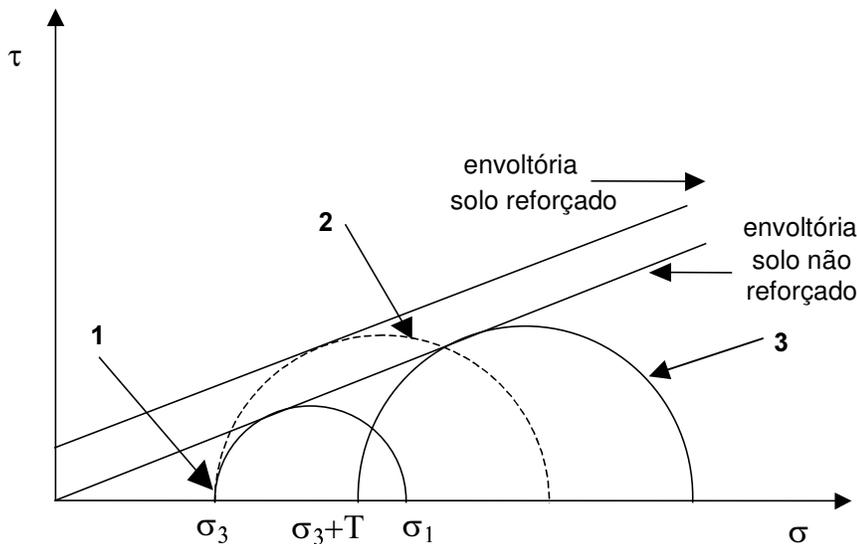


Figura 174 - Envoltórias Obtidas a Partir de Ensaios Triaxiais Reforçados e Não Reforçados

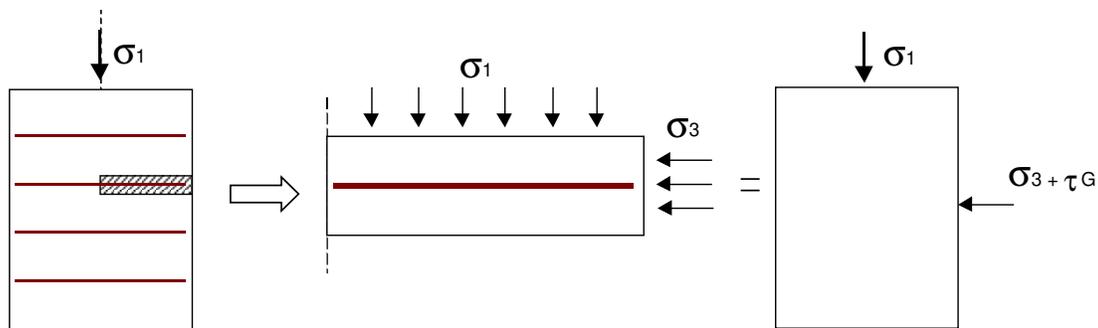
Dois mecanismos distintos podem ocorrer durante os ensaios triaxiais em corpos de prova reforçados (Sáez, 1997): o reforço pode ser tracionado ou pode se deslocar em relação ao solo envolvente.

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

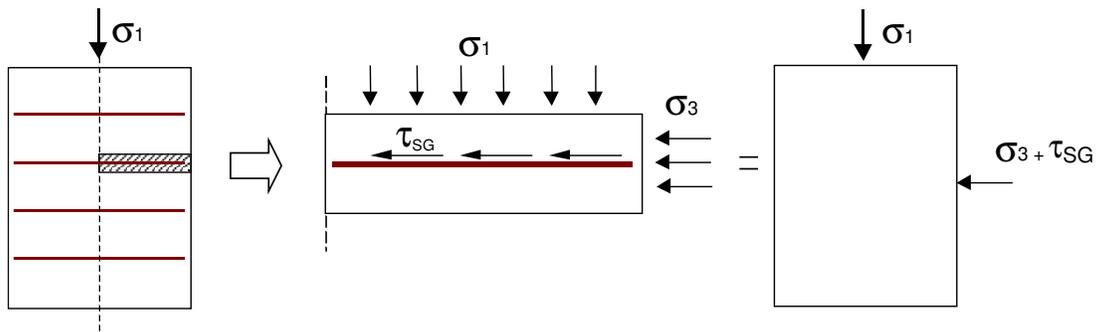
Conseqüentemente, no instante da ruptura, a tensão principal menor será (Figura 175):

$$\sigma_{3f} = \sigma_3 + \tau_G, \quad \text{se o reforço for tracionado;}$$

$$\sigma_{3f} = \sigma_3 + \tau_{SG}, \quad \text{se o reforço se deslocar em relação ao solo.}$$



(a) 1º mecanismo: tração na geogrelha



(a) 2º mecanismo: deslocamento solo-geogrelha

Figura 175 – Mecanismos Observados em Ensaios Triaxiais de Solos Reforçados com Geossintéticos

Ao término dos ensaios, procedia-se à desmontagem dos corpos de prova e à inspeção visual das amostras de geogrelha. As geogrelhas utilizadas nos corpos de prova arenosos apresentavam distorções, sugerindo solicitações de tração durante o ensaio (mecanismo 1). Neste caso, o aumento de σ_3 é provocado pela força de tração na geogrelha.

No entanto, nos ensaios com solo silto-argiloso, a geogrelha deslizava em relação ao solo envolvente, sem apresentar qualquer distorção ou dano. O aumento de σ_3 é provocado pela resistência ao cisalhamento na interface solo-geogrelha (mecanismo 2).

As envoltórias de resistência em termos de diagramas $p \times q$ dos ensaios em areia estão apresentadas na Figura 176. Nota-se que as envoltórias são aproximadamente paralelas, indicando um aumento no intercepto coesivo.

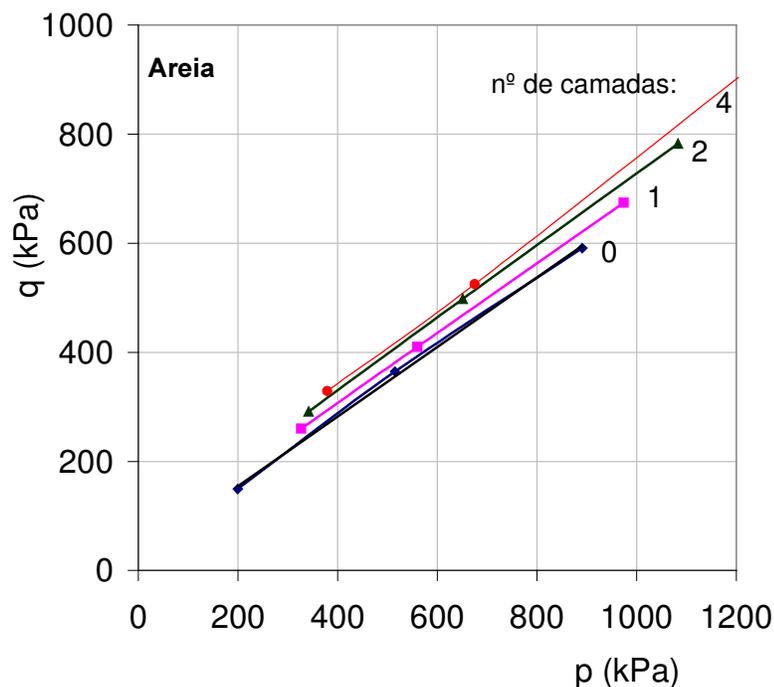


Figura 176 - Envoltórias de Resistência: Ensaios Triaxiais em Areia

De acordo com a constatação de que as geogrelhas foram solicitadas à tração nos ensaios em areia, optou-se por considerar a hipótese de um aumento no valor de σ_3 ao final do ensaio. A Figura 177 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 de τ_G , buscando a adequação dos novos

estados de tensão (obtidos a partir de σ_{3f}) à envoltória do solo não reforçado. A Tabela 37 apresenta os valores da tensão de tração na geogrelha (τ_G), calculados para os 3 níveis distintos de confinamento. Observa-se que a tração na geogrelha (τ_G) aumenta com a tensão confinante.

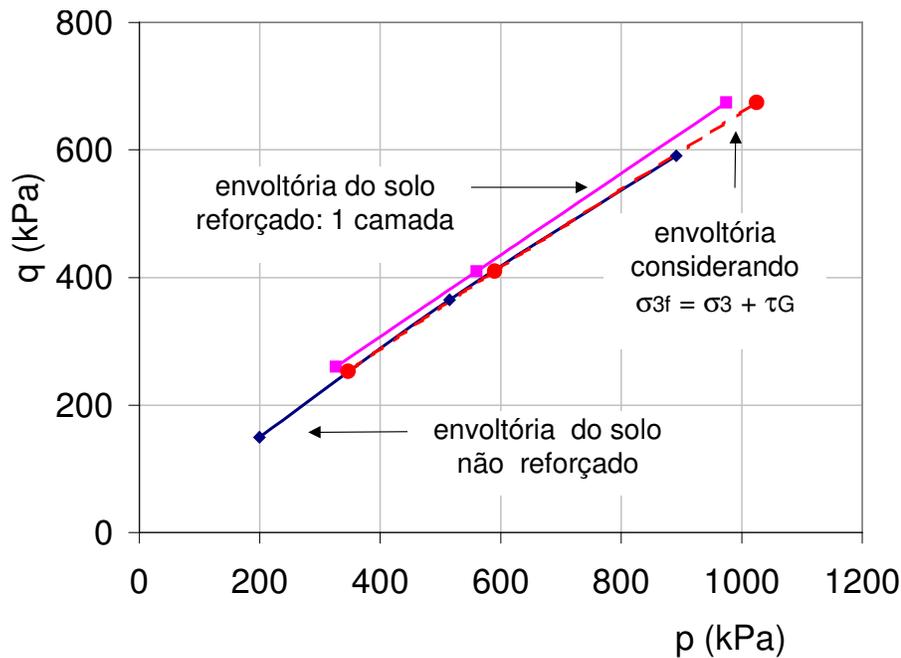


Figura 177 – Aumento de σ_3 : Ensaios Triaxiais em Areia

Tabela 37 - Valores de τ_G : Ensaios Triaxiais em Areia

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

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. Plotou-se então, uma nova envoltória considerando $\sigma_{3f} = \sigma_3 + \tau_{SG}$.

A Figura 178 apresenta a envoltória do silte argiloso não reforçado, a envoltória 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 dos ensaios de cisalhamento direto com reforço horizontal, reportados no Capítulo 8. A resistência na interface silte argiloso/ geogrelha MacGrid pode ser obtida para qualquer nível de tensão confinante vertical, a partir da equação:

$$\tau_{SG} = 37 + \sigma \cdot \tan 21^\circ \quad (97)$$

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 Figura 178 mostra um ajuste adequado quando se considera um aumento de σ_3 devido a uma mobilização de 80% da resistência ao cisalhamento na interface. Os resultados sugerem que a resistência ao cisalhamento na interface não é completamente mobilizada durante o cisalhamento dos corpos de prova.

Cabe ressaltar que no caso particular do solo silto-argiloso, as envoltórias do solo reforçado e não reforçado não são paralelas, como indica a Figura 179. Isto dificulta um bom ajuste dos novos estados de tensão à envoltória do solo não reforçado.

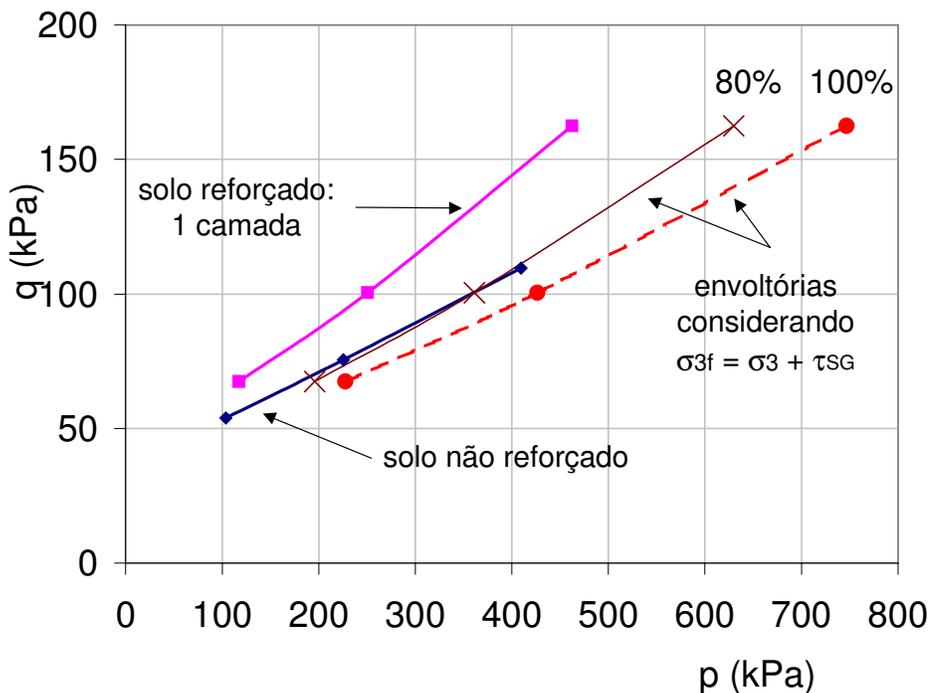


Figura 178 - Aumento de σ_3 : Ensaios Triaxiais em Silte Argiloso

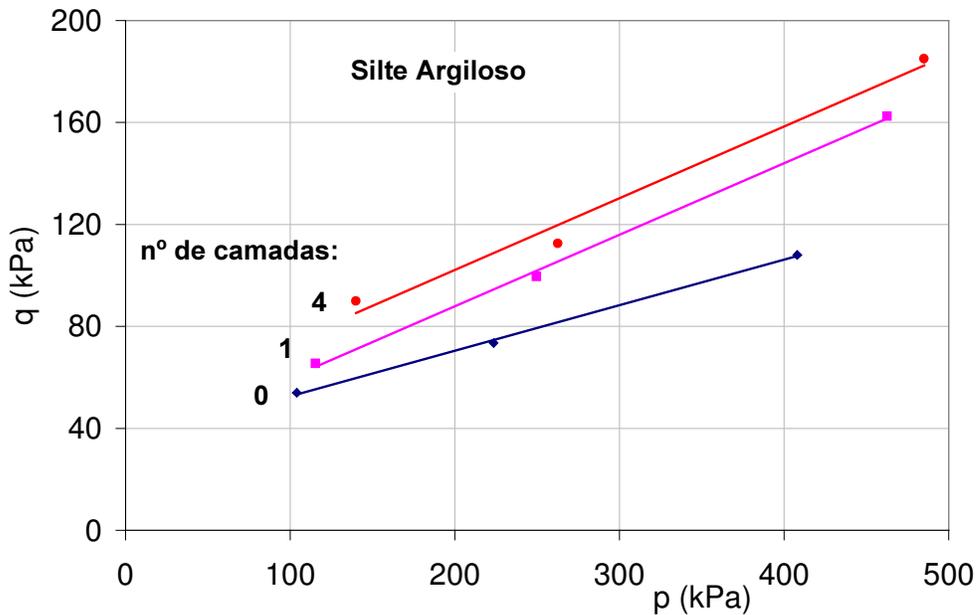


Figura 179 - Envolvórias de Resistência: Ensaios Triaxiais em Silte Argiloso

9.6. Considerações Finais

Neste Capítulo 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 com 1, 2 e 4 camadas de geogrelhas sob tensões confinantes de 50, 150 e 300kPa em equipamentos de grandes dimensões (9" de diâmetro). O objetivo destes ensaios consistiu em avaliar o ganho de resistência e rigidez do conjunto solo-geogrelha com a introdução de camadas horizontais de reforço.

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

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 conduzir à ruptura do corpo de prova por cisalhamento.

É interessante observar que a deformação axial na ruptura aumenta com a introdução de camadas de reforço e com o aumento da tensão confinante.

Quanto à deformabilidade do conjunto, observa-se um aumento de rigidez com a inserção de camadas de geogrelha.

Uma comparação entre os resultados dos ensaios em corpos de prova reforçados com 2 e com 4 camadas mostrou que as camadas de solo localizadas próximo às extremidades dos corpos de prova não exercem influência significativa na resistência do conjunto, uma vez que estão localizadas em uma região que não é solicitada durante o cisalhamento.

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

No entanto, nos ensaios com solo silto-argiloso, a geogrelha deslizava em relação ao solo envolvente, sem apresentar qualquer distorção ou dano. Este mecanismo corresponde ao cisalhamento direto na interface solo-geogrelha e ocorre, no campo, quando a superfície de ruptura é tangente ao reforço.